



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Influência do raio de ponta do entalhe, do
tipo de carregamento e da microestrutura
no processo à fratura do aço estrutural
ABNT-4340.**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Influência do raio de ponta do entalhe, do
tipo de carregamento e da microestrutura
no processo à fratura do aço estrutural
ABNT-4340.**

Fabiano da Cruz Nogueira

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu

Ilha Solteira, Março de 2006.

Influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura do aço estrutural ABNT-4340.

Fabiano da Cruz Nogueira

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** na área de concentração **MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Gilberto Peixoto de Melo / Coordenador do Curso

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Adj. Ruís Camargo Tokimatsu / Orientador

Prof. Dr. André Luis Moreira de Carvalho/ EESC /USP

Prof. Dr. . Wyser Jose Yamakami /FEIS/Unesp

“Eu acredito que o ponto alto da Vida de um homem, a sua maior realização, é aquele momento em que ele deu sangue por uma boa causa e está caído, exausto, no campo de batalha... vitorioso.”

**Vince Lombardi
(1913 - 1970)**

***Aos meus pais que tanto me
ajudaram para minhas realizações...***

***...A Iriane Andressa, minha eterna
companheira, que tanto me
incentiva e ajuda em todos os
momentos.***

...Obrigado!

Agradecimentos Pessoais.

O presente documento é o resultado do trabalho de Mestrado e da dedicação de muitas pessoas, e do empenho e colaboração de outras tantas.

Ao Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu - do Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp, por ter me acolhido e aceitado como orientando e ter me passado valiosos ensinamentos.

Ao Pesquisador Alessandro Roger Rodrigues, por ter contribuído com a rotina de programa para filtragem e obtenção de propriedades dos materiais, e também por ter ajudado enormemente no desenvolvimento deste trabalho de mestrado e em meu aprendizado na área de interesse.

Ao Eng. Msc. Eduardo Leira Kruger, pela valiosa colaboração na execução experimental do meu trabalho, por facilitar minha estada em Campinas e promover a possibilidade de realização de parte do meu trabalho nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

Ao Eng. Msc. Carlos Alexandre Zarate, que apesar de não fazer parte do sub-Grupo Charpy, foi uma pessoa importante para minha entrada no GC3M.

Ao Eng. Diego Campos, pela valiosa colaboração na execução dos corpos-de-prova e ajuda na realização dos tratamentos térmicos.

Prof. Dr. André Luis Moreira de Carvalho - do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos/USP

Ao Prof. Dr. Itamar Ferreira - do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP -, e pelo valioso apoio oferecido em várias oportunidades.

Ao Prof. Dr. Dirceu Spinelli - do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos/USP – pelas facilidades criadas e pela gentileza em permitir a realização de ensaios na máquina de ensaio Charpy instrumentado, sob sua responsabilidade.

Ao Prof. Dr. João Antônio Pereira, pela atenção e por colaborar na análise e processamentos dos sinais medidos.

Ao Prof. Dr. Juno Gallego, Prof. Dr. Antônio de Pádua Lima Filho, Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini e Prof. Dr. Wyser José Yamakami, por colaborarem de diferentes formas para o bom andamento do meu trabalho.

A Iriane Andressa, por ter colaborado na escrita e correção do trabalho de mestrado e por estar sempre ao meu lado.

A Vanessa e Patrícia Davanço, por terem me ajudado na estada em Campinas, concedido um espaço em sua casa, para que eu tivesse lugar para ficar com mais conforto.

*Aos companheiros do **GC3M** – Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais -, por terem me ajudado no desenrolar do trabalho e dos problemas cotidianos.*

Aos companheiros de mestrado, todos que me ajudaram direta e indiretamente, nos estudos, nos trabalhos em grupo ou individuais.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica, Darci Alves Ribeiro, Ronaldo Máscoli, Marino Teixeira Caetano pela grande colaboração na confecção dos corpos-de-prova ensaiados no trabalho.

Ao Elias Amaral dos Santos, técnico em informática, pelo contínuo suporte em software e hardware.

Ao pessoal da secretaria do Departamento de Engenharia Mecânica, a Elaine Nascimento Ferreira de Araújo entre outros, pela atenção despendida, colaboração e orientação em várias questões burocráticas e administrativas.

Aos funcionários do Serviço de Biblioteca e Documentação da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, em especial ao bibliotecário João Josué Barbosa pela colaboração e disponibilização das normas técnicas referentes a citação e referências bibliográficas.

Agradecimentos Institucionais.

A **CAPES** - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo valoroso apoio concedido, fomentando a bolsa de estudo.

A **PROPP** – Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa da Unesp – e ao **PPGEM** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da FEIS/UNESP - pelos auxílios concedidos para os alunos da pós-graduação.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, pela utilização do Laboratório de Ensaaios Mecânicos.

A **UNICAMP** – Universidade Estadual de Campinas pela utilização do Laboratório de Ensaaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica.

Ao **DEM** - Departamento de Engenharia Mecânica, e a **FEIS** - Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, integrantes da UNESP – Universidade Estadual Paulista. Ao **DEM** e a **FEIS** por me acolheram como aluno de pós-graduação, em 2004. Além disso, sou profundamente grato ao DEM, pelas enormes facilidades proporcionadas e por sempre colocar a disposição toda sua infraestrutura.

Ao **GC3M** – Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais -, por ter me dado toda infraestrutura de trabalho e ter proporcionado todos os meios para realização do meu trabalho.

Nogueira, F. C. *Influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura do aço estrutural ABNT-4340.* Ilha Solteira, 2006.130p.. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp . Brasil.

RESUMO

O ensaio de impacto Charpy convencional é um ensaio mecânico consagrado no meio científico e industrial. Sua função é determinar a energia total absorvida para causar a fratura completa de um corpo-de-prova entalhado, padronizado segundo a norma ASTM E-23. Entretanto, a energia global absorvida possui um valor de uso muito limitado. Ela normalmente não é aceita como um indicador quantitativo da resistência à fratura do material. Assim, através da instrumentação adequada, pode-se aumentar a quantidade de informações obtidas a partir do ensaio de impacto Charpy clássico. No presente trabalho, estudou-se a influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura dos corpos-de-prova no processo à fratura dinâmica do aço ABNT-4340 a partir do ensaio Charpy Instrumentado. As diferentes condições microestruturais foram resultantes de diferentes condições de tratamentos térmicos: como-recebido, como-temperado e revenido nas seguintes temperaturas: 473K, 573K, 673K e 773K. Para cada microestrutura foram confeccionados corpos-de-prova com dois tipos de raio de ponta – pré-trincado e entalhe arredondado (0,25mm). Os corpos-de-prova assim preparados foram submetidos ao ensaio Charpy Instrumentado e tiveram seus sinais digitalizados. O sinal capturado com tal cadeia de medição foi utilizado na determinação dos valores de tenacidade à fratura dinâmica. Os resultados experimentais foram obtidos através dos ensaios de dureza, monotônicos (em três pontos), dinâmicos (Ensaio de Impacto Charpy). Os ensaios de dureza foram realizados com objetivo de ratificar a qualidade dos tratamentos térmicos. Os ensaios monotônicos servirão como referências para auxiliar o entendimento dos dados obtidos com os ensaios dinâmicos. Os dinâmicos foram realizados com o objetivo de demonstrar que o ensaio Charpy Instrumentado quando usado com um grande embasamento científico, pode se tornar uma poderosa ferramenta da mecânica da fratura, podendo ser utilizado para caracterizar um material e todo o seu processo de fratura. A partir dos experimentos realizados, podemos concluir que ainda falta um maior entendimento, sobre os sinais captados com a célula de carga, mas podemos perceber que quando esses sinais são filtrados e confrontados com os sinais dos ensaios monotônicos, percebe-se muitas particularidades entre eles, como pode se verificar nos resultados obtidos nesse trabalho de mestrado.

Palavras-chaves: Charpy instrumentado, tenacidade à fratura dinâmica, propriedades mecânicas, aços estruturais e comportamento dinâmico.

Nogueira, F. C. *Influence of the ray of intende tip, of the type of loading and of the microstructure of proof bodies in process the fracture of the structural steel ABNT-4340.* Ilha Solteira, 2006. 130p.. Dissertation (Master's degree) - University of Engineering of Ilha Solteira. Unesp . Brazil.

ABSTRACT

The proof of conventional impact Charpy is a mechanic proof consecrated in scientific in industry. Its function is determinate the absorb total energy in order to the complete fracture in a indented proof body, standardized according to the ASTM E-23 pattern. Therefore, the absorb global energy has a very limited value. It is not accepted a quantities indicator of resistance to the matter fracture. Thus, though adequate instrumentation, it can increase the quantity of information obtained from the proof of the classic impact Charpy. In this paper, we intend to study the influence of the ray of intende tip, of the loading type and of the microstructure of proof bodies in process the fracture of the structural steel ABNT-4340 from the instrumented proof Charpy. The different microstructure conditions are resulted of different conditions of thermal treatments: drawgeting, draw tempering, drawing in following temperatures: 473 K, 573 K, 673 K and 773 K. For each microstructures prepared proof body with two types of tip ray – sharp rack and rounding indented (0,25 mm). Proof bodies prepared this way are submitted the instrumented proof Charpy and have your signal digitalized. The signal capturing with such ranger of measurement will de used in determination of values of toughness to dynamic fracture. The experimental result were obtained through the rehearsals of hardness, almost-static (in three points), dynamic (instrumented proof Charpy). The rehearsals of hardness were accomplished with objective of ratifying the quality of the thermal treatments. The rehearsals almost-static will serve as references for to aid the understanding of the data obtained with the dynamic rehearsals. The dynamic ones were accomplished with the objective of demonstrating that the rehearsal Scored Charpy when used with a great scientific basement, it can become a powerful tool of the mechanics of the fracture, could be used to characterize a material and all your fracture process. Starting from the accomplished experiments, we can end that still lack a larger understanding, on the signs captured with the load cell, but we can notice that when those signs are filtered and confronted with the signs of the rehearsals almost-static, it is noticed a lot of particularities among them, as it can be verified in the results obtained in that master's degree work.

Key Words: *instrument Charpy, toughness to dynamic fracture, mechanic properties, structure steel and dynamic behavior.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	43
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	43
1.2 OBJETIVOS	51
1.2.1 OBJETIVO GERAL	51
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	52
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	53
2.1 FALHA MECÂNICA	53
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE FRATURAS	54
2.2.1 Efeitos de um Entalhe	56
2.3 ENSAIOS DE IMPACTOS CLÁSSICOS	59
2.4 ENSAIO CHARPY INSTRUMENTADO	63
2.5 MECÂNICA DA FRATURA	65
2.6 CONCEITO DE TENACIDADE À FRATURA	68
2.6.1 Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL)	69
2.6.2 Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP)	71
2.6.3 Determinação da tenacidade à fratura dinâmica utilizando o ensaio Charpy instrumentado	72
2.7 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DOS VALORES DE TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA	74
2.7.1 Cálculo da tenacidade à fratura dinâmica elástica-linear, K_{Id}	75
2.7.2 Cálculo da tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástico, J_{Id}	77
3 MATERIAIS E MÉTODOS	82
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	82
3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS	83
3.2.1 Confeção dos corpos-de-prova	83
3.2.2 Tratamentos Térmicos	84
3.2.3 Metodologia para obtenção da Pré-trinca por fadiga nos corpos-de-prova	89
3.2.4 Ensaio de Dureza	93
3.2.5 Ensaio Charpy Instrumentado e Monotônicos	94

3.2.6 Rotina computacional para processamento dos sinais do ensaio Charpy Instrumentado	97
3.2.7 Metodologia empregada para filtragem de sinais.....	100
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	105
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	105
4.2 ENSAIO DE DUREZA	107
4.3 ENERGIA ABSORVIDA DURANTE O PROCESSO DE FRATURA	109
4.4 FORÇAS ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE FRATURA	115
4.4.1 Força de escoamento generalizado envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhe arredondado a agudo	116
4.4.2 Força de iniciação da trinca envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhes arredondado e agudo	122
4.4.3 Força máxima envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhes arredondado e agudo.....	129
4.4.4 Influência das metodologias de filtragem empregadas, Avaliação ISO (Instron Wolpert), Média Móvel e filtragem do sinal pela frequência utilizando as técnicas das Wavelets	134
4.5 CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA (K), MECÂNICA DA FRATURA LINEAR-ELÁSTICA (ENTALHE ARREDONDADO E AGUDO)	138
4.6 CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA, MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTO-PLÁSTICA (ENTALHE ARREDONDADO E AGUDO)	142
5 CONCLUSÕES.....	146
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	152
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas características força - deslocamento classificadas pela norma ISO 14.556 (Fonte: ISO 14 556, 2000)	50
Figura 2 – Estado de tensões em corpos-de-prova, sem e com entalhe. (Fonte Tokimatsu 1995)	58
Figura 3 – Resultado típico do ensaio Charpy clássico para dois materiais distintos A e B (Fonte: Dieter, 1988).....	60
Figura 4 - Corpo de prova Charpy normalizado pela ASTM E-23. (Fonte: American Society for Testing and Materials, 1996)	61
Figura 5 – Resposta força vs tempo para um aço de média resistência mecânica (Fonte: Shockey, 1995).....	64
Figura 6 – Curva Força vs Deslocamento durante um ensaio de impacto Charpy instrumentado. (Fonte Fernandez et. al. 2002)	65
Figura 8: Variáveis abordadas na Mecânica da Fratura (Fonte Toti 2004)	67
Figura 9 – Ramificações da Mecânica da Fratura (Fonte: Tokimatsu 1995)	68
Figura 10 – Tipos básicos de carregamento e escorregamento.....	69
Figura 11: Comportamentos elástico não-linear e elasto-plástico de um corpo sólido (Fonte: Tarpani 1995)	72
Figura 12 – Representação esquemática da curva da tenacidade à fratura de transição dúctil-frágil e áreas de aplicabilidade dos conceitos como Curva de Resposta ao Impacto (Kalthoff, 1985) e o Método DDR - ASTM/EPRI (Ireland 1980, Server et. al. 1975). Fonte: Technical Research Centre of Finland (1993).	73
Figura 13 – Tipos de curvas carga-COD.....	77

Figura 14 – Explicação esquemática do Método Taxa de Alteração da Flexibilidade.	79
Fonte: Yamamoto et. al. (1993).	79
Figura 15 – Explicação esquemática do método da curva codificada (Δa representa a extensão da trinca). Fonte: Yamamoto et. al. (1993).	80
Figura 16 – Extensão da trinca em função da deflexão para corpos-de-prova Charpy (aço A533B) Fonte: Yamamoto et. al. (1993).	81
Figura 17 – Métodos de controle microestrutural utilizados nos corpos-de-prova, para melhora a tenacidade à fratura do material.	84
Figura 19 – Imagem do forno de dos aparatos periféricos utilizados na realização dos tratamentos térmicos.	85
Figura 22 – Curva da rampa de aquecimento e temperatura de revenido	89
Figura 23 – Corpo-de-prova Charpy normalizado pela ASTM E-23.	90
Figura 24 – Corpo-de-prova com pré-trinca na raiz do entalhe.	90
Figura 25 - Representação esquemática dos dois estágios de crescimento da pré-trinca por fadiga.	92
Figura 26 – Modelo esquemático da superfície de fratura do corpo-de-prova Charpy, após o ensaio de impacto.	93
Figura 27 – Foto geral da máquina Charpy Instron Wolpert.	95
Figura 28 – Exemplo de curva carga x tempo x energia, gerada pela máquina gerada durante o ensaio Charpy Instrumentado do aço ABNT-4340, na condição de revenido a 473K, com entalhe arredondado.	95
Figura 29 – Exemplo de curva carga x deslocamento x energia, gerada pela máquina gerada durante o ensaio Charpy Instrumentado do aço ABNT-4340, na condição de revenido a 673K, com entalhe arredondado.	96

Figura 30 - Interface primaria do programa Wavelet Toolbox Main Menu.....	101
Figura 31 - Interface secundaria do Wavelet Toolbox Main (visualização da filtragem do sinal).....	102
Figura 32 - Interface terciária do Wavelet Toolbox Main (filtragem do sinal, retirada dos ruído, utilização dos filtros passa-alta e passa-baixa).	103
Figura 33 - Confrontação do sinal filtrado e do sinal bruto, aço ABNT-4340 revenido a 773 K.	103
Figura 34 – Influência da temperatura de revenido na dureza do aço ABNT-4340.	108
Figura 35 – Energia global envolvida no processo de fratura entalhe arredondado. Visualização da celha de fragilização causada pela martensita revenida a 573 K.	114
Figura 36 – Energia global envolvida no processo de fratura entalhe agudo. Visualização da celha de fragilização causada pela martensita revenida a 573 K.	114
Figura 37 – Sinais do aço ABNT-4340 (Como-recebido), ensaiado monotonicamente com a inserção de ruídos provenientes da máquina de ensaio.	121
Figura 38 – Sinais do aço ABNT-4340 (revenido a 473 K), ensaiado monotonicamente com a inserção de ruídos provenientes da máquina de ensaio, problema na identificação da região linear elastica.	121
Figura 39 - Interface e ferramenta de escolha da região que ocorre a alteração da taxa de flexibilidade. Região da compliance do corpo-de-prova ensaiado monotonicamente, na condição de revenido à 473 K.	128
Figura 40 - Interface e ferramenta de escolha da região que ocorre a alteração da taxa de flexibilidade. Região da compliance do corpo-de-prova ensaiado monotonicamente, na condição de revenido à 573 K.	128

Figura 41 – Sinal de força-deslocamento dos corpos-de-prova entalhados do aço ABNT 4340, evidenciando os sinais sem filtragem (Sinal Bruto), com polimento pela média móvel e filtrado pela frequência (Wavelets), Revenido à 773 K. ...	135
Figura 42 – Análise dos métodos de filtragem do sinal de impacto (atenuação e suavização excessiva do sinal pela filtragem), Análise Gráfica dos três Sinais simultaneamente.....	135
Figura 43 – Sinal dinâmico filtrado pela média móvel (tamanho do filtro - 31), condição de tratamento térmico (como-temperado).....	137
Figura 44 – Sinal dinâmico filtrado pela média móvel (tamanho do filtro - 51), condição de tratamento térmico (Revenido à 473 K).	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de composição química (% em peso) de aços de baixa liga e ultra-alta resistência, normalmente utilizado na fabricação de componentes de aeronaves.	82
Tabela 2 – Composição química do aço utilizado fornecida pela empresa Gerdal (Aços Finos Piratini)	82
Tabela 3 – Composição química realizada no laboratório de ensaios de materiais CT/Unicamp.....	82
Tabela 4 – Especificações técnicas dos materiais utilizados nos tratamentos térmicos.....	86
Tabela 5 – Valores de carga e frequência para obtenção da pré-trinca.....	93
Tabela 6 – Valores de dureza, resultantes das diferentes condições de tratamento térmico.	107
Tabela 7 – Resultados de energias globais extraídos a partir do processo de fratura, entalhe arredondado.	110
Tabela 8 – Resultados de energias globais extraídos a partir do processo de fratura, entalhe agudo.	111
Tabela 9 – Diferença Percentual entre energia lida no Dial (E_D) e do sinal dinâmico (E_{IW} , E_{MM} e E_W), entalhe arredondado.	111
Tabela 10 – Diferença Percentual entre energia lida no Dial (E_D) e dinâmica (E_{IW} e E_{MM}), entalhe agudo.....	112
Tabela 11 – Resultado da Força de Escoamento Generalizado (F_{gy}), entalhe arredondado.....	117

Tabela 12 – Resultado da Força de Escoamento Generalizado (F_{gy}), entalhe agudo.	117
Tabela 13 – Diferença Percentual entre Força de Escoamento Generalizado Monotônico (F_{gyM}) e do sinal dinâmico (F_{gyISO} , F_{gyMM} e F_{gyW}), entalhe arredondado.....	118
Tabela 14 – Diferença Percentual entre Força de Escoamento Generalizado Monotônico (F_{gyM}) e do sinal dinâmico (F_{gyISO} e F_{gyMM}), entalhe agudo.....	118
Tabela 15 – Resultado Força de Iniciação da Trinca (F_{iu}), Entalhe Arredondado. ..	122
Tabela 16 – Resultado Força de Iniciação da Trinca (F_{iu}), Entalhe Agudo.	123
Tabela 17 – Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (E-399) P_5 e do sinal dinâmico (F_{iuISO} , F_{iuMM} e F_{iuW}), entalhe arredondado.....	123
Tabela 18 - Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (F_{iuM}) e da Força de Iniciação da Trinca Monotônico (E-399) P_5	124
Tabela 19 – Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (F_{iuM}) e do sinal dinâmico (F_{iuISO} e F_{iuMM}), entalhe agudo.	124
Tabela 20 – Resultado Força Máxima (F_M), entalhe arredondado.	130
Tabela 21 – Resultado Força Máxima (F_M), entalhe agudo.....	130
Tabela 22 – Diferença Percentual entre Força Máxima Monotônico (F_{mM}) e do sinal dinâmico (F_{mISO} , F_{mMM} e F_{mW}), entalhe arredondado.	131
Tabela 23 – Diferença Percentual entre Força Máxima Monotônico (F_{mM}) e do sinal dinâmico (F_{mISO} e F_{mMM}), entalhe agudo.....	131
Tabela 24 – Cálculo da tenacidade Aparente à Fratura, Entalhe Arredondado (Mecânica da Fratura Linear-Elastica).	138
Tabela 25 – Cálculo da tenacidade à Fratura, Entalhe Agudo (Mecânica da Fratura Linear-Elastica).	139

Tabela 26 – Diferença Percentual entre K_{QA} [ASTM E-399/90] e K_{QAA} [ASTM E-399/90], K_{IdA} [ASTM E-399/90 e Angamuthu], entalhe arredondado.	139
Tabela 27 – Diferença Percentual entre K_{QP5} [ASTM E-399/90] e K_{QFIU} [ASTM E-399/90], K_{Id} [ASTM E-399/90 e Angamuthu], entalhe agudo.	140
Tabela 28 – Cálculo da tenacidade Aparente à Fratura, Entalhe Arredondado (Mecânica da Fratura Elásto-Plástica).	142
Tabela 29 – Cálculo da tenacidade à Fratura, Entalhe Agudo (Mecânica da Fratura Elásto-Plástica).	143
Tabela 30 – Diferença Percentual entre J_{QA} e J_{IdAISO} [Avaliação ISO], J_{IdAMM} [Média Move] e J_{IdAW} [Wavelets], entalhe arredondado.	143
Tabela 31 – Diferença Percentual entre J_{QA} e J_{IdAISO} [Avaliação ISO], J_{IdAMM} [Média Move], entalhe agudo.	144

NOMENCLATURA

a	Comprimento da pré-trinca
a_0	Comprimento inicial da trinca
a_f	Pré-trinca por fadiga
B	Espessura do corpo-de-prova
CCR	Compliance Changing Rate
C	Flexibilidade elástica aparente
C_{el}	Flexibilidade elástica
E	Energia
E_t	Energia Total
E_i	Energia de início de propagação de trinca
E_M	Energia Monotônica
E_D	Energia lida diretamente no <i>Dial</i>
E_{IW}	Energia obtida pela <i>Instron Wolpert</i>
E_{MM}	Energia obtida pela aplicação da média móvel
E_w	Energia obtida pela aplicação das wavelets
F_{gy}	Força de escoamento generalizado
F_{gyM}	Força de escoamento generalizado monotônico
F_{gyISO}	Força de escoamento generalizado obtido pela <i>Instron Wolpert</i>
F_{gyMM}	Força de escoamento generalizado obtido pela aplicação da média móvel
F_{gyw}	Força de escoamento generalizado obtido pela das wavelets
F_{iu}	Força de iniciação da trinca
F_{iuM}	Força de iniciação da trinca monotônica
F_{iuISO}	Força de iniciação da trinca obtida pela <i>Instron Wolpert</i>

F_{iuMM}	Força de iniciação da trinca obtida pela aplicação da média movel
F_{iuw}	Força de iniciação da trinca obtida pela aplicação das wavelets
F_m	Força máxima
F_{mM}	Força máxima monotônica
F_{mISO}	Força máxima obtida pela <i>Instron Wolpert</i>
F_{mMM}	Força máxima obtida pela aplicação da média movel
F_{mw}	Força máxima obtida pela aplicação das wavelets
J_{QAM}	Tenacidade aparente à fratura monotônica (candidata)
J_{IdAISO}	Tenacidade aparente à fratura dinâmica obtida pela <i>Instron Wolpert</i>
J_{IdAMM}	Tenacidade aparente à fratura dinâmica obtida pela aplicação da média móvel
J_{IdAw}	Tenacidade aparente à fratura dinâmica obtida pela aplicação das wavelets
J_m	Tenacidade à fratura monotônica
J_{QM}	Tenacidade à fratura monotônica (Candidata)
J_{IdISO}	Tenacidade à fratura dinâmica obtida pela <i>Instron Wolpert</i>
J_{IdMM}	Tenacidade à fratura dinâmica obtida pela aplicação da média movel
K_{QAE}	Tenacidade aparente à fratura dinâmica obtida pela aplicação da formulação apresentada pela E-399 (candidata)
K_{QAA}	Tenacidade aparente à fratura dinâmica obtida pela aplicação da formulação apresentada por Angamuthu (candidata)
K_{IdA}	Tenacidade à fratura dinâmica obtida pela aplicação da formulação apresentada por Angamuthu
K_{ICP5}	Tenacidade à fratura quase-estática, obtida pela aplicação da carga P_5
K_{ICFu}	Tenacidade à fratura quase-estática, obtida pela aplicação da carga F_{u1}
S_m	Deslocamento de carga máxima
S_t	Deslocamento total
t	Tempo
W	Largura do corpo-de-prova
v	Velocidade de impacto

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Desde 1999 foi realizada uma revisão literária pelo GC3M (Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Metais), sobre a instrumentação de uma máquina Charpy Convencional, sendo o principal colaborador desse levantamento o pesquisador Alessandro Roger Rodrigues. Toda a revisão a seguir datada de 1999 à 2002, foi realizada pelo pesquisador em conjunto com o grupo de pesquisa.

Como ocorre com todos os ensaios mecânicos, o ensaio Charpy clássico possui vantagens e limitações. As principais vantagens dizem respeito à facilidade de execução e a obtenção rápida dos resultados, lidos diretamente no mostrador da máquina de ensaio. A principal limitação relaciona-se a pouca informação extraída do processo de fratura, isto é, apenas a energia global de ruptura do corpo de prova pode ser medida.

A instrumentação adequada de uma máquina de ensaios de impacto é muito importante. É possível acompanhar o processo de fratura dos materiais ensaiados e obter informações adicionais quando se compara com o ensaio convencional. Todavia, com a inserção da instrumentação, qualquer que seja sua forma, alguns problemas podem surgir durante as etapas do processo, isto é, desde a escolha do tipo de transdutor, sua localização na máquina de ensaio, até a obtenção dos sinais da força em função do tempo, sua interpretação e validação.

A forma de instrumentação mais comumente implementada é por meio de extensômetros elétricos de resistência, posicionados no martelo pendular. Existe uma infinidade de combinações que relacionam tipo e localização dos extensômetros objetivando sempre a busca por confiabilidade nos resultados. No âmbito mundial, Ireland (1977), dos Estados Unidos, firmou-se como um ícone no estudo aprofundado da instrumentação aplicada

ao ensaio Charpy convencional, sobretudo durante a década de 70. Análises minuciosas sob sua ótica geraram diversas implicações e condições necessárias que norteiam e validam até hoje a adequada instrumentação. Publicou diversos trabalhos e participou de inúmeras conferências científicas, tal como a *International Conference of Dynamic Fracture Toughness*, promovida pela *American Society for Metals-ASM*, em 1977 na Inglaterra.

Böhme & Kalthoff (1982), do Instituto de Materiais de Freiburg - Alemanha, estudaram o comportamento de corpos de prova entalhados bi-apoiados submetidos a cargas de impacto. Construídos de resina epoxy e com dimensões maiores que as utilizadas no ensaio Charpy convencional, os corpos de prova foram submetidos a uma massa de impacto de 4,9kg e velocidade de 1m/s. Os sinais força - tempo foram medidos e comparados por meio de extensômetros elétricos posicionados no topo do martelo de impacto e na base de apoio dos corpos de prova.

Estudos mais recentes, porém em menor número, têm trazido valiosas contribuições, pois uma das grandes aplicações do ensaio Charpy instrumentado refere-se ao estudo de vasos de pressão e reatores nucleares, onde a microestrutura e as propriedades mecânicas dos componentes são sensivelmente influenciadas pela variação de temperatura e pela irradiação de nêutrons oriundos dos processos envolvidos. Um monitoramento contínuo dessas peças torna-se necessário para preservar a integridade estrutural dos componentes. Neste contexto, o ensaio Charpy instrumentado apresenta um papel essencial, uma vez que fornece uma quantidade maior de informações em comparação ao ensaio Charpy convencional.

Yamamoto & Kobayashi (1993), da Universidade Tecnológica de Toyohashi Japão, desenvolveram um sistema de avaliação da tenacidade à fratura dinâmica auxiliada por computador, associando-o à máquina de ensaio Charpy convencional. Por meio desse sistema denominado *Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing - CAI* - é possível determinar a tenacidade à fratura dinâmica, dada pelos parâmetros K_{Id} e J_{Id} , além das energias

obtidas com base nas curvas força - deflexão, oriundas de corpos de prova Charpy-V pré-trincados.

Uma pesquisa sobre tenacidade à fratura dinâmica de materiais soldados utilizados em vasos de pressão de reatores nucleares foi publicada por Schmitt et al. (1994) no *International Journal of Pressure Vessels & Piping*. Nesse estudo, avaliou-se essa propriedade utilizando corpos-de-prova entalhados e os resultados foram validados por meio da simulação numérica. A instrumentação fundamentou-se na colagem de extensômetros no topo do martelo pendular e nos corpos de prova, próximos ao ponto de apoio na máquina de ensaio.

Um outro trabalho, realizado por Aggag & Takahashi (1996), do Instituto de Pesquisa de Mecânica Aplicada - Japão, estudou a influência de filtros elétricos e mecânicos aplicados ao ensaio Charpy instrumentado no intuito de melhorar a qualidade dos sinais obtidos. Extensômetros elétricos de resistência foram devidamente colados tanto no martelo pendular como nas proximidades da raiz do entalhe dos corpos de prova. Os filtros mecânicos foram implementados utilizando-se laminas de borracha de diferentes espessuras e comparou-se os sinais medidos para todos os casos considerados.

Perosanz et. al. (1998), do Instituto de Tecnologia Nuclear de Madri - Espanha, apresenta resultados de tenacidade à fratura dinâmica utilizando o ensaio Charpy instrumentado de dois aços: um de uso comum e outro típico de aplicações em vasos de pressão de reatores nucleares. Uma forma de obtenção da velocidade e deslocamento do martelo durante o processo de fratura dos corpos de prova também foi apresentada. Ela baseia-se nas integrações da curva força - tempo considerando a massa do martelo e a lei do movimento de Newton.

Böhme ECT. et. al. (1999), do Instituto de Materiais de Freiburg - Alemanha, publicou um trabalho de pesquisa no *Nuclear Engineering and Design* que avalia e compara a dispersão dos resultados de tenacidade à fratura dinâmica e monotônica, medidos em

diferentes temperaturas na região de transição de aços ferríticos utilizados em vasos de pressão de reatores nucleares. Os ensaios de tração monotônica, dinâmica e Charpy instrumentado foram comparados.

O efeito da temperatura e da taxa de carregamento na tenacidade à fratura dinâmica de aços estruturais foi estudado por Cun-Jian (1999), do Departamento de Pesquisa em Soldagem - China. Seu trabalho, publicado no *Materials and Design*, utiliza uma máquina de ensaio Charpy instrumentada como ferramenta para determinar a tenacidade à fratura dinâmica e estudar as influências dessas variáveis.

No Brasil, poucas instituições de pesquisa têm se dedicado ao estudo do ensaio Charpy instrumentado. O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL - uma empresa do sistema Eletrobrás criada em 1974, vem utilizando uma máquina de ensaio Charpy instrumentada há algumas décadas. Localizada na Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro, este centro de pesquisa realiza, entre outras atividades, trabalhos em pesquisa e desenvolvimento, ensaios, certificações, perícias e consultorias. Em projetos conjuntos com a Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, gerou alguns trabalhos de mestrado, como alguns estudos sobre o comportamento à fratura dinâmica de materiais poliméricos compostos.

Delforge (1994), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Ilha Solteira, em conjunto com o Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de Campinas - UNICAMP, por meio de um trabalho de mestrado, promoveu a instrumentação do pêndulo de uma máquina de ensaio Charpy convencional. Utilizando extensômetros elétricos de resistência devidamente fixados no martelo pendular, foram determinados diversos valores de tenacidade à fratura dinâmica aparente de materiais metálicos, tais como aços ABNT 1020, 4140 e 300M, de qualidade aeronáutica, além da liga de alumínio Al 7050 T76. Diversas taxas de carregamento e

temperaturas de ensaio foram efetuados no sentido de avaliar o desempenho da instrumentação implementada.

Quinan (1996), no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, realizou uma análise do ensaio de impacto Charpy instrumentado, também num trabalho de mestrado, recorrendo-se a extensômetros elétricos de resistência, como elementos transdutores, posicionados no martelo pendular. Um modelo numérico de distribuição de deformações foi desenvolvido utilizando o *software* de modelagem ANSYS. O objetivo foi avaliar a qualidade da colagem dos extensômetros mediante a comparação dos resultados de deformação apresentados pelos modelos numérico e experimental.

Alguns materiais, tais como aços ABNT 1045, tratados termicamente por têmpera, revenido ou normalização em várias temperaturas, bem como a liga de alumínio X6221 ensaiada à temperatura ambiente, foram utilizados como corpos de prova para validar o estudo. Determinou-se, além das curvas força - tempo típicas do ensaio Charpy instrumentado, as respectivas energias calculadas por meio das próprias curvas e comparou com os valores de energia obtidos diretamente do mostrador da máquina, considerados como valores de referência.

A Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP adquiriu no final de 2000, pelo Departamento de Engenharia de Materiais, uma máquina de ensaio Charpy instrumentada da marca *Instron Wolpert*. A instrumentação, por extensômetros elétricos, posiciona-se no cutelo do martelo pendular. A aquisição e o tratamento dos sinais são efetuados por pacote computacional confeccionado pela *National Instruments*, adquirido em conjunto com a máquina.

Estudos mais recentes têm trazido valiosas contribuições, como exemplo a Conferência Charpy no ano de 2001 realizada na França comemorando os cem anos de ensaio Charpy. Dentro deste contexto foram publicados aproximadamente cento e sessenta trabalhos dos

quais apenas dez por cento se preocuparam com a instrumentação, interpretação, modelagem do ensaio charpy instrumentado. Toshiro Kobayashi, em parceria com Toda, H. e Masuda T. analisaram os sinais obtidos do ensaio de impacto convencional e do ensaio de tensão de impacto. Utilizaram uma máquina de ensaio Charpy convencional com capacidade de 490J com velocidade de impacto de 5m/s e uma máquina servo-hidráulica de com capacidade de 45kN e velocidade de carregamento de 0,01 a 12m/s.

Manahan M. P. e Stonesifer no CCC 2001 (Charpy Centenary Conference 2001) estudaram a otimização de designs de martelos (cutelos). Revelaram que o carregamento indicado pelo martelo do ensaio Charpy Instrumentado pode ser adversamente afetado por forças inércias no martelo e por variações no contato da distribuição de força entre o martelo e corpo-de-prova.

Manahan et. al (2001) relata a aplicação de encoders ópticos na medida da energia de impacto Charpy tem aumentado significativamente a precisão da determinação da “energia do dial”. Martelos instrumentados constituem um método alternativo de medida de energia, que é acurado e reproduzível para ensaios tanto com corpo-de-prova convencional como em miniatura, enquanto fornecem informações úteis, tais como carregamento geral produzido, carga máxima, carga de fratura frágil, e carga obtida para fratura frágil. Tem-se observado que a energia total absorvida medida usando estas duas tecnologias geralmente apresenta-se em acordo, mas as vezes difere por uma quantidade significante. A energia total absorvida do martelo instrumentado tem sido maior ou menor do que a energia medida pelo encoder óptico dependendo da ductilidade dos corpos-de-prova entre outros fatores.

Morita et. al. (2001) apresenta problemas relacionados com a medida do sinal de carregamento no ensaio Charpy Instrumentado. Constatou que ao diminuir a espessura do corpo-de-prova resulta em uma ligeira diminuição dos fatores de calibração. Isto foi atribuído para localização da deformação próxima da região a qual os "strain gages" foram colados. Os

resultados sugeriram fortemente que o sistema deve ser calibrado para diferentes espessuras dos corpos-de-prova para conhecer a acuracidade do carregamento de impacto.

Tango et. al. (2001) da *Ecole des Mines de Paris*, propôs uma simulação numérica do ensaio *Charpy-V* no regime dúctil-frágil de transição. Para a simulação foram utilizadas três condições; (i) a temperatura viscoplástica depende do comportamento do material não alterado, (ii) iniciação da trinca e o crescimento são causados por falha dúctil e (iii) fratura frágil. O modelo da falha dúctil foi baseado no modelo modificado de Rousselier. A fratura por clivagem foi descrita usando o modelo de Beremin.

Recentemente, a norma ISO 14.556 consolida os procedimentos necessários para instrumentação de uma máquina de ensaio convencional. Lançada em 2000, este documento propõe metodologias para montagem e calibração do transdutor de força (martelo instrumentado), especifica em termos de resposta em frequência a cadeia de medição do ensaio, classifica o material ensaiado a partir do sinal obtido. Dentro destes procedimentos e recomendações destacam alguns como, a avaliação dinâmica de todo o sistema, é considerada satisfatória se um corpo-de-prova constituído de aço apresentar um pico maior que 8kN, para uma velocidade de impacto entre 5 e 5,5 m/s, a calibração da força poder ser realizada estaticamente aplicando-se uma força conhecida no martelo instrumentado, devidamente montado em um aparato que represente as mesmas condições do ensaio dinâmico. Por se tratar de um sinal transiente, o sistema de gravação da curva força - tempo preferível é um gravador com armazenagem digital, contendo interface eletrônica para tratamento dos dados via microcomputador e conversor analógico-digital de no mínimo 8 bit, com uma taxa de amostragem de 250kHz. Um sistema de gravação de 12 bit ou um gravador com capacidade de armazenamento de 2000 pontos do sinal em um tempo de 8ms também são considerados adequados para a aquisição.

A avaliação da curva força - deslocamento para a determinação das forças utilizadas nos cálculos da tenacidade é feita considerando-se a classificação dos diversos formatos de sinais, enquadrada pela própria ISO como do tipo A ao F. Os tipos A e B indicam que a energia do material ensaiado encontra-se no patamar da curva de transição dúctil-frágil do ensaio Charpy clássico. As curvas do tipo C, D e E indicam que a energia encontra-se na região de transição. Por último, na curva do tipo F, a energia localiza-se no patamar superior, como mostrada na Figura 1.

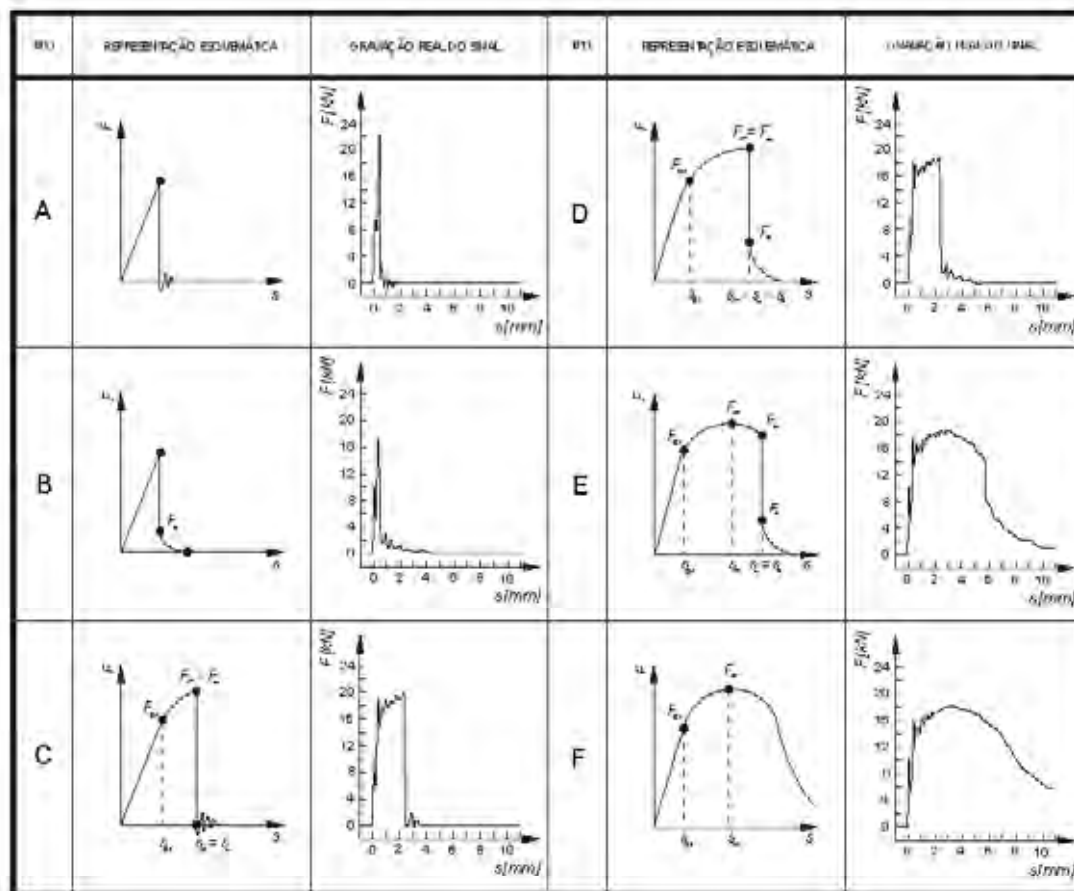


Figura 1 – Curvas características força - deslocamento classificadas pela norma ISO 14.556 (Fonte: ISO 14 556, 2000)

A revisão realizada pelo GC3M de 2001 à 2005, está relatada na sessão 3 deste trabalho de mestrado, onde se mostra a introdução da máquina Charpy Instrumentada no âmbito da Mecânica da Fratura.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo central do presente trabalho de pesquisa é analisar e obter uma aproximação de uma ferramenta capaz de estudar a fratura resultante de um carregamento de impacto, onde serão levado em conta a influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura aço estrutural ABNT-4340 a partir do ensaio Charpy Instrumentado.

O material a ser utilizado na pesquisa é o aço ABNT-4340. As diferentes condições microestruturais foram resultantes de diferentes condições de tratamentos térmicos: como-recebido, como-temperado e revenido nas seguintes temperaturas: 473K, 573K, 673K e 773K. Para cada microestrutura serão confeccionados corpos-de-prova com dois tipos de raio de ponta – trinca aguda e entalhe arredondado (0,25mm), essas variações foram realizadas com o intuito de aumentar a faixa de tempo de duração do processo de fratura, a fim de averiguar como se comporta as ferramentas de estudo à fratura resultante dos carregamentos de impactos nessa faixa de tempo.

Foram realizados vários ensaios de dureza, monotônicos e dinâmicos, nas varias condições de tratamento térmico em que se encontravam os corpos-de-prova. O ensaio de dureza foi realizado para averiguar e atestar a qualidade do tratamento térmico. O ensaio monotônico foi realizado para servir de referência de comparação, para com os resultados obtidos com o ensaio Charpy Instrumentado. O ensaio dinâmico ou ensaio Charpy Instrumentado é o grande objetivo de estudo e entendimento desse trabalho, tentando um maior entendimento sobre suas características intrínsecas e suas metas no âmbito da Mecânica da Fratura.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Confeccionar os corpos-de-prova, para a realização dos ensaios monotônico (três pontos) e ensaios dinâmicos (Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado);
- ✓ Realizar o tratamento térmico propostos para o aço ABNT-4340, para obter em iguais condições a microestrutura e dureza, dentro de determinados padrões estabelecidos;
- ✓ Confeccionar dois tipos de raio de ponta, arredondados (0,25mm) e pré-trincados (trinca aguda);
- ✓ Realizar ensaios de dureza, monotônicos e dinâmicos;
- ✓ Coletar, tratar e interpretar os sinais através da cadeia de medição (instrumentação).

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Falha Mecânica

A falha mecânica é um problema antigo e muito grave que esta longe de ser resolvido completamente, apesar dos principais avanços alcançados. As falhas, de maneira geral, são decorrentes dos seguintes fatores, que agem isoladamente ou de forma combinada, Tokimatsu (1995):

- ✓ Deficiência de projeto;
- ✓ Seleção inadequada dos materiais;
- ✓ Imperfeições no material;
- ✓ Deficiência no processamento;
- ✓ Erros de montagem;
- ✓ Condições impróprias de operação;
- ✓ Manutenção e inspeção inadequada;
- ✓ Ação agressiva do meio.

A análise de falhas de um componente estrutural normalmente requer a identificação do tipo de falha. A falha pode ocorrer devido a ação de um ou mais mecanismos de danos. Entretanto, existem quatro maneiras genéricas segundo as quais um componente mecânico pode deixar de as funções para as quais foi projetado, Tokimatsu (1995).

- ✓ danos superficiais;
- ✓ deformação elástica;
- ✓ deformação plástica;
- ✓ fratura.

Ainda que, qualquer tipo de falha indesejável, independente da sua origem, a fratura é o problema mais inquietante. As falhas estruturais decorrentes de fraturas têm provocados substanciais perdas materiais, paralisação de serviços essenciais e, muitas vezes, perdas de vidas humanas.

2.2 Classificação de Fraturas

Muitos critérios têm sido empregados para descrever e classificar os vários tipos de fraturas decorrentes, esses critérios são baseados em requisitos com origens completamente distintas, é comum haver muita confusão.

Isto ocorre principalmente devido a tendência de se associar a deformação plástica macroscópica com a fratura, ou seja, devido a tendência de se classificar as fraturas segundo a base dual dúctil-frágil.

A palavra frágil esta associada a uma deformação plástica mínima, enquanto que a palavra dúctil possui uma conotação de grande deformação plástica. Mas os metais podem fraturar por clivagem, um mecanismo basicamente frágil, após uma deformação plástica relativamente grande e da mesma forma, é possível ocorrer uma deformação macroscópica desprezível em um metal que fratura por micromecanismo dúctil, por exemplo, microcavidades.

De maneira geral, devido as condições de carregamento, existem 4 maneiras distintas de fratura:

- ✓ Sobrecarga;
- ✓ Impacto;
- ✓ Fadiga;
- ✓ Fratura assistida pelo meio.

O tipo de solicitação também exerce influencia sobre o processo de fratura, de modo que, ele deve ser considerado na análise de fratura. Os tipos de solicitação são descrito por termos como:

- ✓ Tração;

- ✓ Compressão;
- ✓ Flexão;
- ✓ Torção;
- ✓ Cisalhamento.

Outros critérios comumente utilizados para classificar as fraturas são baseados nos seguintes aspectos:

- ✓ Velocidade de propagação de trinca;
- ✓ Modo cristalográfico de fratura;
- ✓ Aspecto macroscópico da fratura;
- ✓ Deformação plástica macroscópica;
- ✓ Energia de fratura (tenacidade);
- ✓ Deformação plástica microscópica;
- ✓ Micromecanismo de fratura.

Por isso, a classificação quanto ao tipo de fratura baseada apenas na deformação plástica macroscópica não é satisfatória, um exemplo significativo pode ser verificado em um corpo-de-prova de um aço de baixo carbono que sofre um grande alongamento seguido de uma fratura por clivagem que pode ser classificado tanto como frágil, como dútil. O fator complicador aí é que a fratura por clivagem pode ser iniciada pela interação de discordâncias, fenômeno este que por sua vez, decorre do processo de deformação plástica. Este fato também torna difícil a classificação quanto ao tipo de fratura.

Portanto, como os critérios possuem origens distintas, é comum ocorrer de fraturas serem classificadas como dútil por um determinado critério e como frágil, quando outro critério é utilizado. Tais acontecimentos geram polêmica e dificultam a classificação da fratura baseada em um único critério. Com isso, infelizmente, não existe um critério universalmente aceito para classificar os vários tipos de fratura. Assim, para evitar que ocorra

confusão na classificação de uma fratura é importante explicar claramente qual critério está sendo empregado.

2.2.1 Efeitos de um Entalhe

Ainda que no início do século XX, em 1913, o problema de um componente entalhado tenha sido equacionado, durante algum tempo o efeito provocado por um entalhe só foi entendido de maneira parcial. Tinha em mente que o único efeito associado com a presença de um entalhe era o da concentração de tensões. Sendo assim, é importante analisar-se com mais acurácia quais são os efeitos provocados por um entalhe.

As mudanças produzidas pela introdução de um entalhe tem importantes consequências no processo de fratura, Dieter (1981). Tanto a nucleação como a propagação de uma trinca são favorecidas por altas tensões de tração, Red-Hill (1982). Um entalhe além de produzir concentrações de tensões, introduz alterações no estado de tensões, Dieter (1981).

Um concentrador de tensões como uma trinca (entalhe agudo), introduz um pico local de tensão na raiz da trinca. No entanto, se existe ductilidade suficiente, quando a tensão local excede o limite de escoamento do material ocorre um escoamento plástico na ponta do entalhe. O escoamento plástico tira energia existente na ponta da trinca, alivia as altas tensões, e limita o pico de tensões ao nível do limite de escoamento do material. Por outro lado, a concentração continua a aumentar até a fratura, se não ocorrer escoamento localizado, Tokimatsu (1995).

Segundo Dieter (1981), uma ductilidade adequada é um fator de importância em engenharia, pois permite ao material redistribuir tensões localizadas. É difícil atingir altas tensões quando o metal se deforma facilmente por escoamento plástico. Entretanto, é importante ressaltar que a ductilidade não é uma propriedade absoluta de um metal. Entre os vários aspectos que podem afetá-la encontra-se o estado de tensões.

O efeito maior de um entalhe não é a introdução de uma concentrações de tensão, mas a produção de um estado triaxial de tensões na raiz do entalhe, Dieter (1981).

Segundo [ASM – Metals Handbook], o escoamento plástico é controlado pela tensão de cisalhamento. Quanto maior a tensão de cisalhamento mais fácil a ocorrência do escoamento plástico. Pode ser assumido que o escoamento plástico ocorreria quando as tensões locais atingirem um dados valor critico da tensão de cisalhamento.

A existência de um estado triaxial de tensão eleva o valor da tensão na qual ocorre o escoamento plástico. Uma vez que τ_c , valor critico da tensão de cisalhamento para provocar o cisalhamento, é o mesmo para o material base, esteja ele com entalhe ou não, é necessário um valor maior da tensão longitudinal local para produzir o escoamento num corpo de prova entalhado. Portanto, como um resultado do estado de tensões triaxial produzido pelo entalhe, a tensão de escoamento efetiva de um corpo-de-prova entalhado é maior do que a tensão de escoamento uniaxial, porque é mais difícil expandir a zona escoada na presença de tensões triaxiais, Dieter (1981).

O estado de tensão triaxial de um entalhe resulta numa espécie de *endurecimento por entalhe*, porque introduz uma forte restrição ao escoamento plástico, Dieter (1981). Qualquer sistema de capaz de produzir uma combinação de grandes tensões de tração e pequenas tensões de cisalhamento favorece a ocorrência de uma fratura de caráter frágil, Red-Hill (1982), ou seja, precedida de pouca deformação plástica.

Segundo ASM – Metals Handbook, a ductilidade não é uma propriedade absoluta, e sim, uma propriedade de um estado do material. Por isso, ainda que os corpos-de-prova lisos (sem entalhe) possam ser utilizados para medir tenacidade, normalmente, as medidas dessa propriedade são realizadas em corpos-de-prova entalhados ou pré-trincados. Isto porque, a presença de um entalhe em um membro estrutural carregado, influência o estado de tensões e

o comportamento à fratura. Descontinuidades são geralmente focos de fratura. A fratura geralmente ocorre em uma região onde as tensões localizadas são muito altas.

Assim, fica a análise de que o principal efeito de um entalhe é a alteração provocada na ductilidade local. Por esta razão, a medida de tenacidade mais comumente aceita atualmente, esta relacionada com a resistência que o material oferece na presença de um entalhe ou trinca.

Para um melhor entendimento do assunto abordado, considere dois corpos-de-prova de um mesmo material, ambos sob tração, sendo que um deles contém um entalhe e o outro não, como mostra as Figuras 2(a) e 2(b). As Figuras 2(c) e 2(d), mostram os estados de tensões para dois casos, definidos pelas tensões principais e representados por um círculo de Mohr.

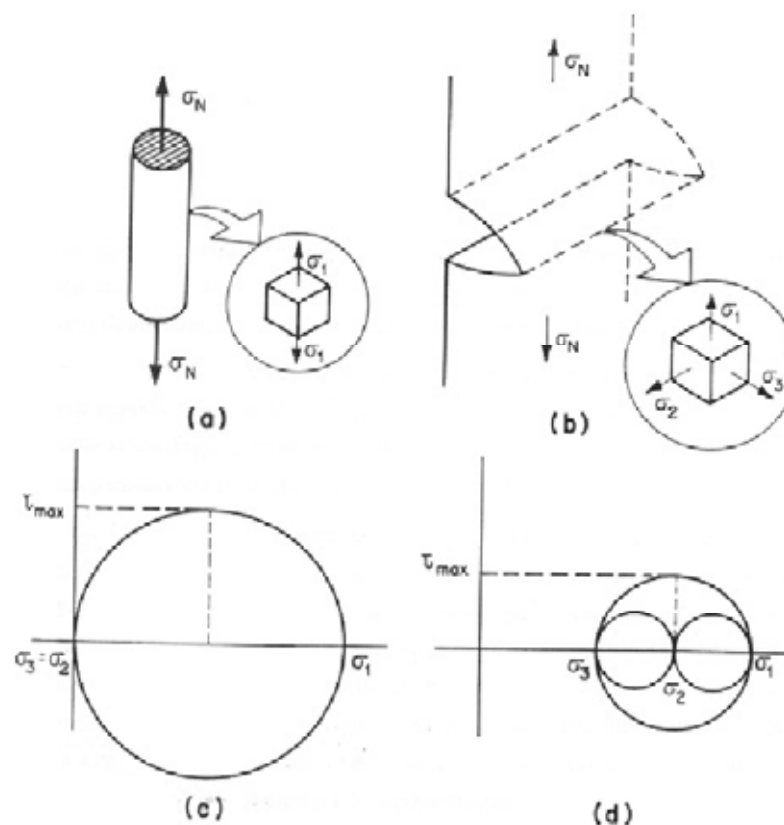


Figura 2 – Estado de tensões em corpos-de-prova, sem e com entalhe. (Fonte Tokimatsu 1995)

O estado de tensão triaxial de um entalhe resulta numa espécie de endurecimento por entalhe, por que introduz uma forte restrição ao escoamento plástico, como ilustrada na Figura 2(b). Assim qualquer sistema de tensão capaz de produzir uma combinação de grandes tensões de tração e pequena tensão de cisalhamento favorece a ocorrência de uma fratura frágil. Com isso o principal efeito de um entalhe é a alteração provocada na ductilidade local. Por esta razão, a medida de tenacidade mais aceita, esta relacionada com a resiliência que o material oferece na presença de um entalhe ou trinca, Tokimatsu (1995)

2.3 Ensaios de Impactos Clássicos

A tenacidade de um material pode ser determinada por diferentes ensaios, diferentes taxas de deformação ou de carregamento. Embora a área sobre a curva tensão – deformação, obtida num ensaio de tração, seja uma medida de tenacidade do material, ela é pouco utilizada para utilizar o comportamento de uma fratura dos materiais. Dentre os ensaios tidos como tradicionais, ou seja, excluindo os da mecânica da fratura, a tenacidade é mais comumente medida sobre altas taxas de deformação, como num ensaio de impacto Tokimatsu et. al. (1999). Uma vez que a medida de tenacidade mais aceita está correlacionada com a resistência que o material oferece a presença de uma trinca ou entalhe, invariavelmente os corpos de prova são entalhados ou pré-trincados antes da condução dos ensaios. Os resultados apresentados são obtidos na forma de energia absorvida pelo corpo-de-prova durante o impacto em função da temperatura Broek (1995). A Figura 3 exemplifica alguns resultados típicos de um ensaio Charpy clássico para dois materiais distintos A e B.

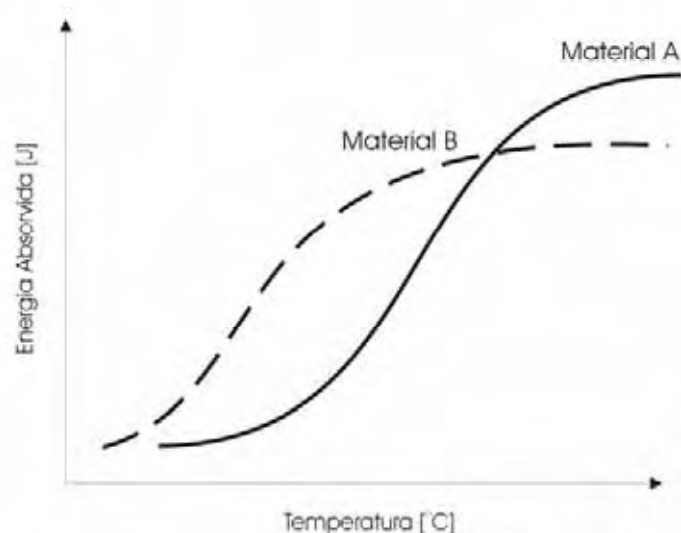


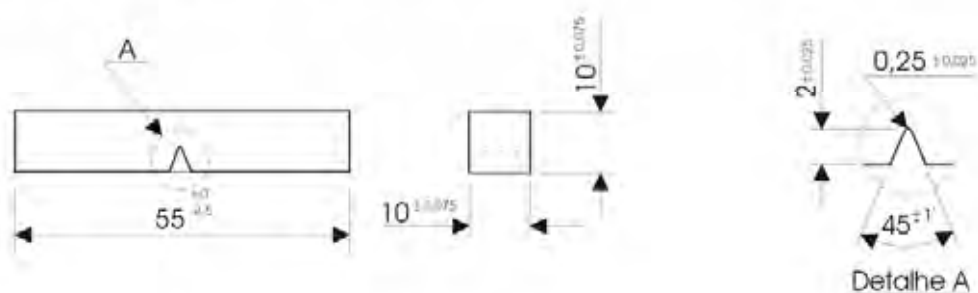
Figura 3 – Resultado típico do ensaio Charpy clássico para dois materiais distintos A e B (Fonte: Dieter, 1988)

Os ensaios são denominados de ensaios dinâmicos, onde altas taxas de deformação estão envolvidas. A resposta a essa solicitação é expressa por uma função transiente no tempo. As principais responsáveis pela maioria das falhas frágeis que ocorrem em serviço, são descontinuidades geométricas ou microestruturais que introduzem um estado triaxial de tensões, tal como a que existe na ponta de um entalhe, e particularmente sob temperaturas baixas. Porém, uma vez que esses efeitos são acentuados para taxas de carregamento acentuados, vários tipos de ensaios de impactos tem sido utilizados para determinar a suscetibilidade dos materiais à fratura frágil [Dieter 1988, ASTM E23].

Os ensaios Charpy e Izold são refinamentos dos ensaios que foram desenvolvidos no início do século XX [ASM-Metals Handbook], que se diferenciam essencialmente pelas dimensões do corpo-de-prova e por seu posicionamento ao receberem o impacto: horizontal no primeiro e vertical no segundo. Nesses ensaios, que atualmente são considerados clássicos, um corpo-de-prova entalhado é submetido ao impacto de um peso conhecido, caindo de uma altura e sob temperaturas conhecidas, em uma máquina do tipo pendular. Nos sistemas mais simples, os resultados são unicamente em termos da energia total absorvida pelo corpo-de-prova durante o de fratura por impacto.

Um grande número de corpos-de-prova com geometrias diferentes é utilizado para compor as duas classes de ensaios mais usuais. As amostras Charpy são mais comumente aplicadas nos Estados Unidos, enquanto os corpos-de-prova Izod são mais utilizados na Europa. Ambos são normalizados segundo a *American Society for Testing and Materials*, norma ASTM E-23.

O corpo-de-prova Izod, raramente utilizado hoje em dia, também possui uma seção quadrada de 10mm e um comprimento de 75mm. O entalhe é construído à 28mm de uma das extremidades e contém os mesmos característicos do entalhe Charpy. No ensaio Izod, os corpos de prova são engastados na base da máquina. A Figura 4 mostra o desenho e as dimensões do corpo de prova Charpy-V.



Acabamento superficial: 2µm na superfície do entalhe e na face oposta e 4µm nas outras superfícies

Tolerância geométrica nas superfícies da seção transversal: $90^{\circ} \pm 1^{\circ}$

Figura 4 - Corpo de prova Charpy normalizado pela ASTM E-23. (Fonte: American Society for Testing and Materials, 1996)

Apesar de muitos ensaios diferentes terem sido desenvolvidos para o estudo de fraturas, avaliações posteriores comprovam a eficácia do ensaio Charpy. Constata-se que o ensaio é confiável, reproduzível e os resultados são poucos dispersivos. Porém, quando a preparação dos corpos de prova é apenas regular, mesmo que o ensaio seja rigorosamente controlado, pode ocorrer uma grande dispersão dos resultados. Essa dispersão se deve também às variações locais nas propriedades dos aços - material mal elaborado - enquanto outras ocorrem devido às dificuldades em se preparar entalhes perfeitamente reprodutíveis. Tanto a

forma, a profundidade do entalhe, quanto o posicionamento adequado do corpo de prova na máquina de impacto são variáveis críticas.

Como ocorre em vários ensaios, o ensaio em pauta apresenta algumas limitações. A principal medida é a energia absorvida para fraturar o corpo de prova numa dada temperatura. Entretanto, é importante compreender que a energia absorvida no ensaio Charpy é apenas um parâmetro qualitativo, sem utilização direta nos cálculos de projetos em engenharia. Neste ensaio não há medidas do nível de tensão, o que dificulta correlacionar à energia absorvida com o desempenho em serviço.

A principal aplicação do ensaio Charpy na engenharia fundamenta-se na seleção de materiais resistentes à fratura frágil. A filosofia do projeto, baseada no ensaio Charpy, se restringe em selecionar um material que possua suficiente tenacidade quando sujeito as condições severas de serviço, de modo que a capacidade do componente estrutural em suportar o carregamento possa ser calculada pelos critérios convencionais da resistência dos materiais, sem considerar, de forma quantitativa, as propriedades de fratura do material ou os efeitos de concentração de tensões provocadas pelas trincas.

Assim, a estratégia de projeto para controle da fratura, segundo essa filosofia, visa simplesmente que o componente operará no patamar superior, isto é, acima da temperatura de transição. O objetivo é evitar a fratura de caráter frágil. No entanto, esse procedimento não impede a ocorrência da fratura, pois a tenacidade dos materiais é finita mesmo no patamar superior da curva de transição.

Diversos fatores interferem no resultado da energia absorvida pelo corpo de prova ou na temperatura de transição. De um modo geral, esses fatores podem ser divididos em fatores físicos e metalúrgicos. Composição química, tipo de tratamento térmico, tamanho de grão e orientação dos corpos-de-prova constituem-se nos fatores metalúrgicos. Os fatores físicos são formas e tamanhos dos corpos-de-prova, tipos de entalhes e taxas de deformação.

2.4 Ensaio Charpy Instrumentado

Desde a década de 70, com Ireland (1970), vários pesquisadores tem estudado métodos e procurados técnicas para se determinar a tenacidade à fratura dinâmica a partir do ensaio de impacto, Rodrigues et. al.(2001).

Entre estes estudos e propostas, uma modificação do ensaio de impacto Charpy clássico vem recebendo grande atenção. Este novo ensaio, conhecido como ensaio de impacto Charpy Instrumentado, Yamamoto et. al. (1993), surgiu como uma alternativa promissora, pois objetiva a caracterização precisa de um processo dinâmico de fratura, a despeito das inúmeras complicações relacionadas à instrumentação. Esta modificação normalmente compreende a instrumentação do martelo, transformando em uma célula de carga, do pêndulo Charpy, por meio de extensômetros elétricos, de modo a se obter mais informações a cerca do ensaio.

A Figura 5, ilustra esquematicamente o comportamento das curvas força vs tempo como função da temperatura para um aço de média resistência. A instrumentação permite identificar os vários estágios no processo de fratura. O valor da energia W_M é associado à área sob a curva força vs tempo até o carregamento máximo P_M . Este valor de impulso é convertido em energia aplicando a lei do movimento de Newton, que considera a velocidade do pêndulo decrescente durante o processo de deformação e fratura. Esta velocidade decrescente é proporcional à força instantânea aplicada no corpo de prova em qualquer tempo particular t_i Hertzberg (1995).

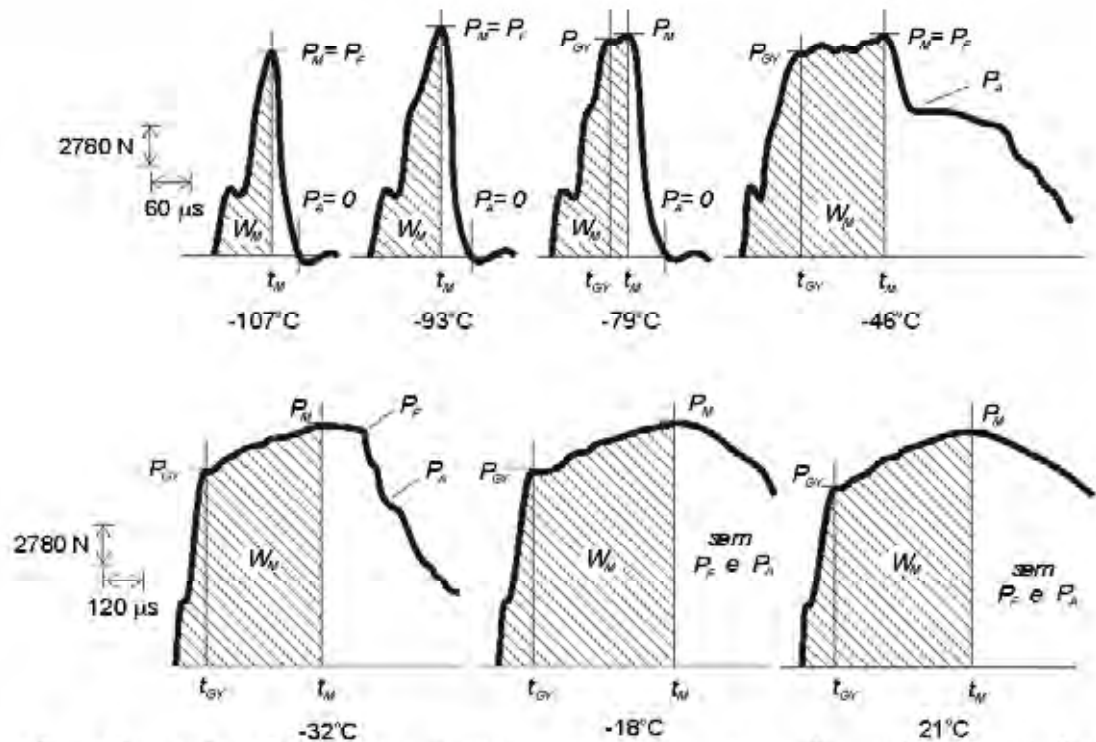


Figura 5 – Resposta força vs tempo para um aço de média resistência mecânica (Fonte: Shockey, 1995)

O ensaio consiste em se registrar, os sinais da força de impacto do martelo no corpo-de-prova, e imprimi-los na forma de gráficos de Força vs Tempo e de Força vs Deslocamento. No sistema instrumentado e informatizado Charpy, o deslocamento na linha de carga é obtido, e a partir das curvas P vs t e P vs S obtém-se informações sobre a carga (força) de escoamento, P_{GY} , carga máxima, P_M . Este ultimo parâmetro é de especial importância no cálculo da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} . É medida a carga de inicio da instabilidade da trinca e a carga de termino da instabilidade da trinca, bem como os seus desvios tempos de deslocamentos de escoamento, respectivamente, t_{GY} e S_{GY} , Maximo, t_M e S_M .

Da curva Força vs Deslocamento é possível determinar as energias relativas aos processos de nucleação e iniciação (E_i) e de propagação (E_p) da trinca assumida numa análise simples, como, respectivamente, a energia até a força máxima e após a força máxima, que não são possíveis de serem distinguidas no ensaio clássico. A energia total absorvida no impacto também pode ser obtida pela integração numérica da curva, como mostrado na Figura 6.



$$E = \int F v dt$$

$$E_t = E_i + E_p$$

Figura 6 – Curva Força vs Deslocamento durante um ensaio de impacto Charpy instrumentado. (Fonte Fernandez et. al. 2002)

2.5 Mecânica da Fratura

A Mecânica da Fratura é uma aproximação fundamentada sobre algumas hipóteses simplificadoras, algumas conjecturas e um volume considerável de informações experimentais. Ela exprime uma nova metodologia de projeto que contorna o dilema de tensão infinita na ponta de uma trinca, quando aplica a teoria clássica da resistência dos materiais. Na essência, trata-se de uma ferramenta de análise quantitativa que permite prever o comportamento de uma estrutura trincada sob efeitos de tensões.

Segundo Tokimatsu (1995), a teoria da Mecânica da Fratura foi originalmente desenvolvida por volta de 1920, e é sustentada sobre o trabalho de Griffith (Estudo da Fratura do Vidro), que observou que uma trinca em um material, quando submetida a uma determinada tensão, apresenta um comportamento característico ao tipo de material e ao tamanho da trinca. Porém, a teoria de Griffith não considera a deformação plástica sofrida pelo

material. Segundo Irwin (1948), foi adicionado à expressão de Griffith, um termo relacionando à energia de deformação plástica.

O período pós-II Guerra Mundial, pode ser considerado como o marco que separou a história da Mecânica da Fratura em duas épocas distintas. Há, entretanto uma incerteza em que período ocorreu esta mudança. Uma possível fase de transição gira em torno da década de 60, quando os fundamentos da Mecânica da Fratura Elástica Linear, desenvolvidas a partir dos trabalhos de Griffith, baseando-se na observação de que trincas atuando como controladores de tensão, fora razoavelmente estabelecido, e quando os pesquisadores desenvolveram análises para validar o modelamento da região de processo da fratura desenvolvida na frente da trinca.

A Engenharia da Mecânica da Fratura abrange várias áreas do conhecimento científico, como mostra a Figura 7, mas esta fundamentada sobre a mecânica dos sólidos e ciências dos materiais. A mecânica dos sólidos é utilizada para descrever o campo de tensões e deformações à frente de uma trinca aguda. A ciências dos materiais permite relacionar o processo de fratura com aspectos relevantes da microestruturas dos materiais. O aumento do conhecimento neste campo tem possibilitado o desenvolvimento de materiais com maior resistência à fratura Tokimatsu (1995).

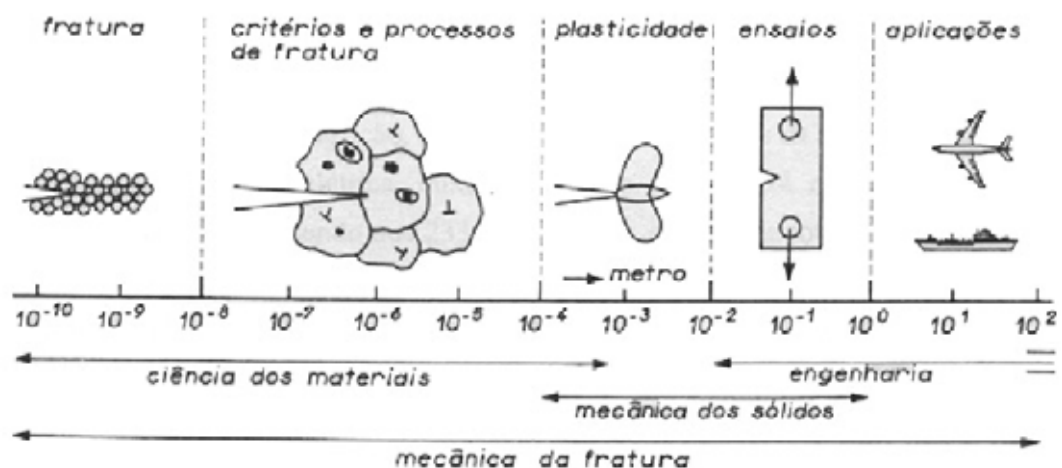


Figura 7 - Área do conhecimento abrangidas pela engenharia da mecânica da fratura (Fonte Broke 1995)

A mecânica da fratura assume que defeitos sempre existem em um corpo sólido e que são suficientemente grandes se comparados com algumas dimensões características da microestrutura, como por exemplo, o tamanho de grão. Estas trincas ou defeitos semelhantes a trincas agem como intensificadores de tensão, e assim localmente, a tensão pode ser muito maior do que a tensão de fratura do material. A Figura 8, mostra três variáveis abordadas simultaneamente na Mecânica da Fratura.



Figura 8: Variáveis abordadas na Mecânica da Fratura (Fonte Toti 2004)

A mecânica da fratura estende o conceito de tenacidade aos corpos sólidos elásticos lineares, não lineares e elasto-plásticos na presença de descontinuidades tipo trincas, pois estes defeitos modificam o estado de tensões locais, não só pela concentração de tensão, mas também, pela produção de um estado triaxial de tensão, como estão exemplificados na Figura 9.

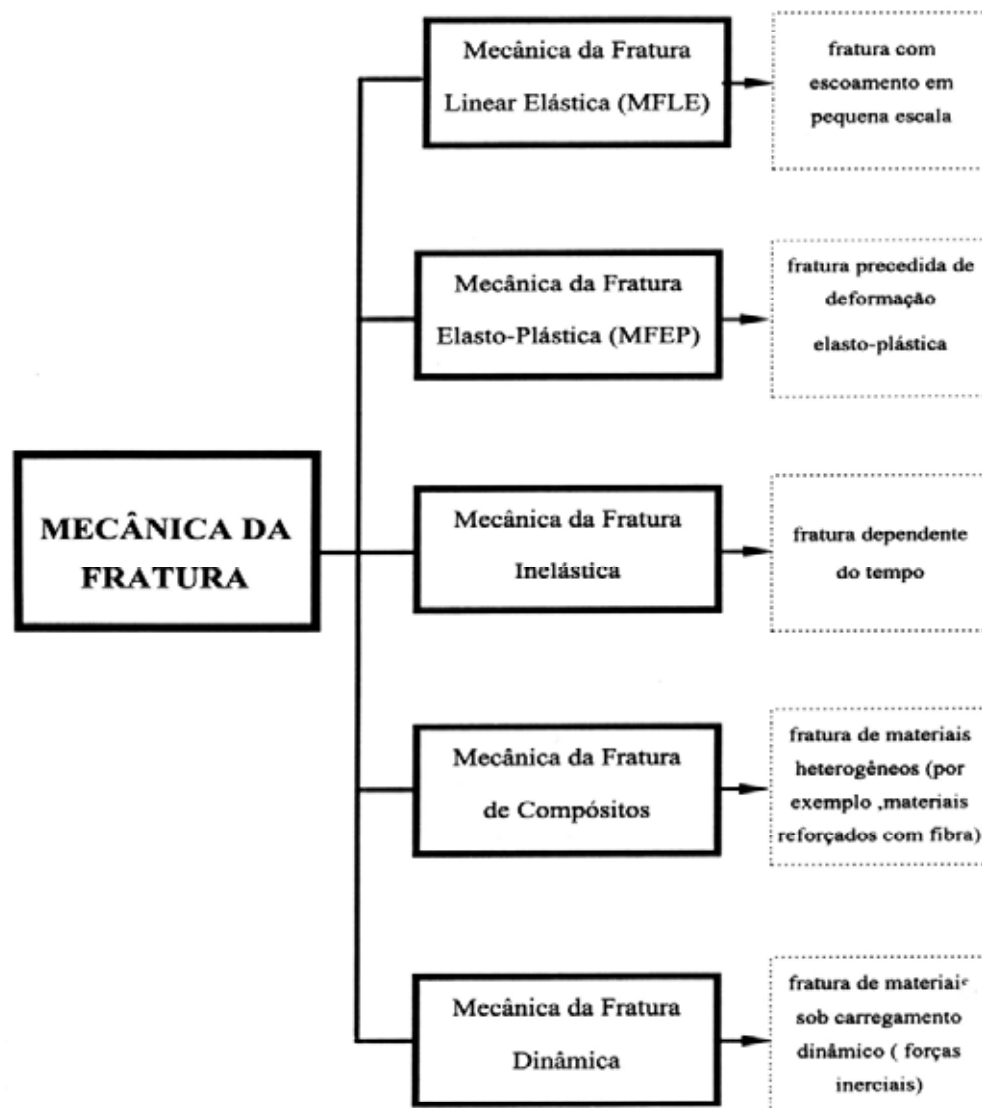


Figura 9 – Ramificações da Mecânica da Fratura (Fonte: Tokimatsu 1995)

2.6 Conceito de Tenacidade à Fratura

Os materiais em geral, dependendo dos campos de tensões aplicadas, podem apresentar comportamento elástico e/ou plástico. De acordo com a literatura, a plasticidade pode ser descrita como sendo um comportamento de um corpo sólido que se deforma permanentemente sob a ação de cargas externas. A elasticidade pode ser descrita como o comportamento reversível dos sólidos, que retorna a sua forma imediatamente quando a carga

externa é removida. A tenacidade de um modo geral indica a quantidade de trabalho que pode ser realizado sobre um determinado material, sem causar a fratura do mesmo.

2.6.1 Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL)

Basicamente, a Mecânica da Fratura linear admite que a fratura de um corpo sólido ocorre a partir de um defeito pré-existente atuando como um intensificador e /ou concentrador de tensões, quando o campo de tensões elásticas na ponta da trinca atinge um determinado valor crítico.

A descrição do campo de tensões na ponta de uma trinca é efetuada levando-se em consideração três tipos básicos de carregamento, como a Figura 10 e os seguintes deslocamentos descritos abaixo.

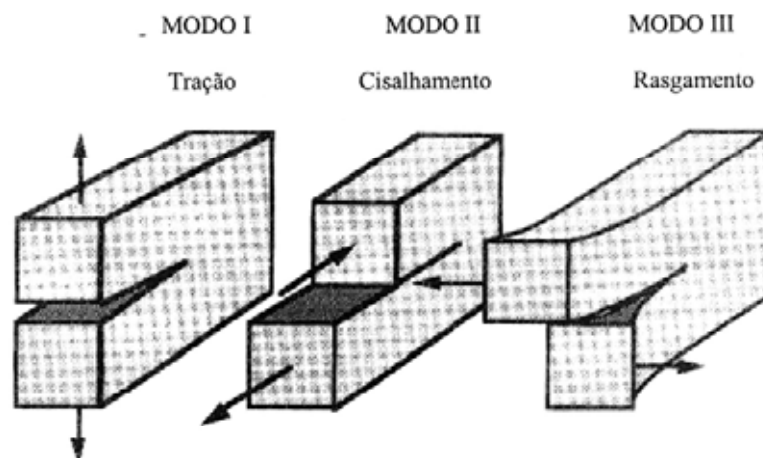


Figura 10 – Tipos básicos de carregamento e escorregamento

- ✓ Modo I – Carregamento em tração, com direção de deslocamento das superfícies da trinca perpendicularmente a si mesmas.
- ✓ Modo II – Carregamento em cisalhamento (escorregamento), com a direção deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesma e perpendicularmente à frente de propagação.
- ✓ Modo III – Carregamento de cisalhamento (rasgamento), com a direção de deslocamentos das superfícies das trincas paralelamente a si mesmas e à frente de propagação.

Na teoria, o campo de tensões que atua a frente da trinca como no Modo I tende a atingir valores extremamente altos à medida que se aproxima da ponta da trinca, ou seja, quando o raio da ponta da trinca tende a zero. Porém isto não ocorre na realidade, pois há um escoamento plástico do material formando uma zona deformada plasticamente na ponta da trinca. A abordagem mais simples para um escoamento elástico perfeitamente plástico é o um nível de tensão que se torne constante e igual ao limite de escoamento por todo o interior da zona plasticamente deformada.

A espessura de um componente exerce forte influencia sobre o estado de tensões na ponta da trinca, podendo predominar tensão plana ou deformação plana. Em uma chapa fina, por exemplo, a tensão σ_z pode atingir valores considerados baixo devido à relativa insuficiência do material ao longo de sua espessura.

Quando a espessura é suficientemente grande, σ_z pode atingir o valor correspondente à deformação plana.

A ocorrência direta dessas duas condições é o comportamento diferente da deformação do material. Deste modo, componentes mais espessos, onde predomina o estado de deformação plana, estão menos sujeitos ao escoamento plástico, o que leva a em menores ductilidade e tenacidade quando comparados aos componentes finos, onde predomina o estado de tensões plana.

2.6.2 Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP)

Para níveis intermediários de tenacidade à fratura, ocorre uma transição entre fratura frágil e a dúctil. Se a tenacidade à fratura exibida pelo material nas condições de carregamento aplicados relativamente baixa, a teoria da MFEP deve ser aplicada. Se for suficientemente alta, a teoria original da Mecânica da Fratura, com base na intensidade na intensidade do campo de tensões elásticas K , deve ser modificado para levar em consideração os efeitos da alta plasticidade a ponta da trinca. Rice citado por Anderson (1995), introduziu o conceito de integral $-J$, que caracteriza as relações tensão – deformação desenvolvida em um sólido elástico-plástico na presença de um trinca. A premissa básica para o desenvolvimento da integral $-J$ é de que o comportamento elasto-plástico pudesse ser aproximado pelo elástico não-linear. Pela idealização da deformação plástica da ponta da trinca como sendo elástica não-linear, Rice generalizou o conceito de taxa de liberação de energia, ou força para extensão da trinca, para materiais não lineares. Foi demonstrando que a taxa não linear de energia liberada pode ser expressa como uma integral de linha denominada integral $-J$, ao longo de um contorno arbitrário em torno de uma trinca.

A Figura 11 os comportamentos elástico não-linear e elasto-plástico de um corpo sólido, respectivamente.

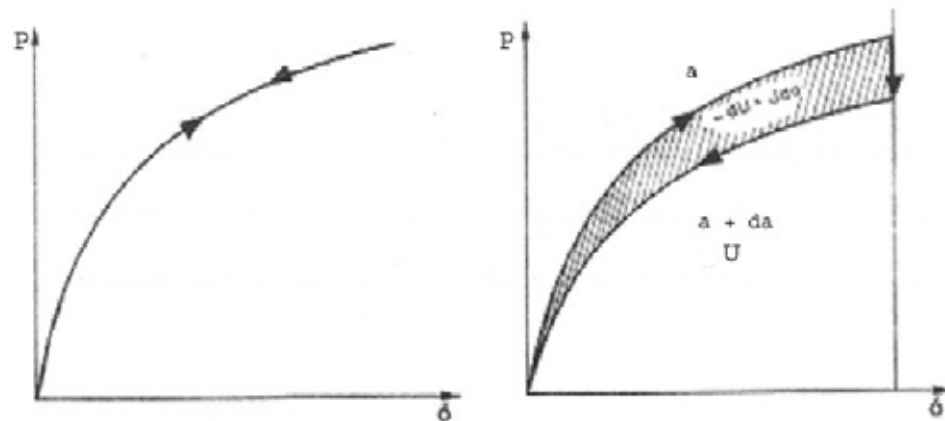


Figura 11: Comportamentos elástico não-linear e elasto-plástico de um corpo sólido (Fonte: Tarpani 1995)

Pode-se definir a integral $-J$ para sólidos elasto-plásticos reais como a força motriz para avanço da trinca, ou ainda como a taxa de liberação de energia para extensão da trinca.

$$J = - \frac{dU}{da} \Big|_{\delta \text{ ou } P \text{ constante}} \quad (4)$$

Onde U é a energia elástica armazenada durante o carregamento para abertura da trinca.

a é o comprimento da trinca;

δ é o deslocamento aplicado a um corpo elástico não-linear;

P é a carga aplicada.

2.6.3 Determinação da tenacidade à fratura dinâmica utilizando o ensaio Charpy instrumentado

Procedimentos aplicados na avaliação da tenacidade à fratura dependem fortemente do mecanismo de fratura do material. No caso de materiais ferríticos a tenacidade à fratura geralmente apresenta uma dependência à temperatura. Na Figura 12, a fratura por clivagem

predominantemente ocorre na região I, e a fratura alveolar na região III. Uma mistura de mecanismos de fratura é observado na região II. Na região I e parcialmente na região II, embora não existam normas específicas para testes dinâmicos de fratura, aplicam-se normas da mecânica da fratura elástica linear (ASTM E 399) ou da mecânica da fratura elasto-plástica (ASTM E 813) para avaliar o fator de intensidade de tensão crítico, K_{IC} ou Integral-J, respectivamente.

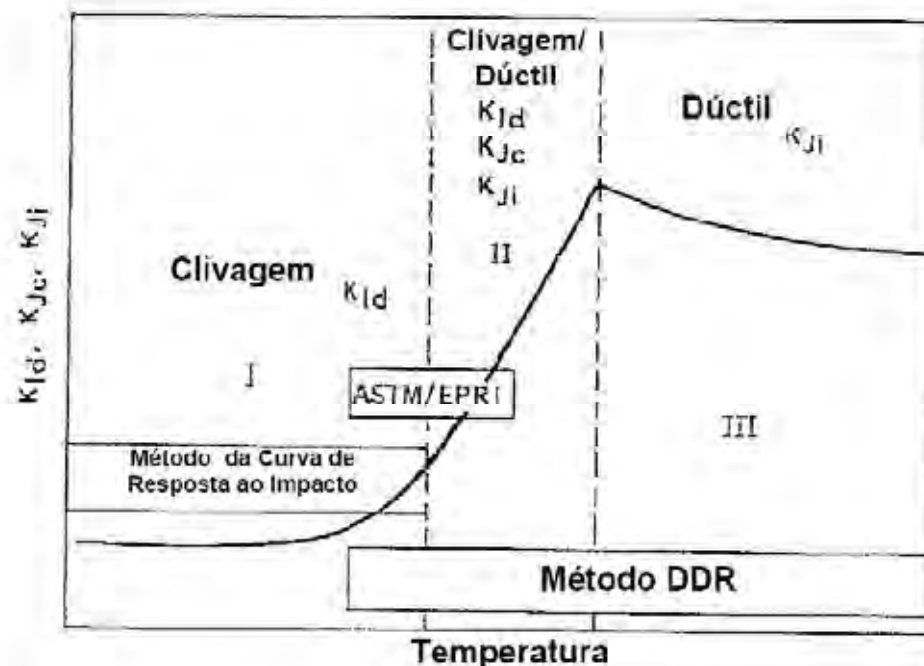


Figura 12 – Representação esquemática da curva da tenacidade à fratura de transição dúctil-frágil e áreas de aplicabilidade dos conceitos como *Curva de Resposta ao Impacto* (Kalthoff, 1985) e o *Método DDR - ASTM/EPRI* (Ireland 1980, Server et. al. 1975). Fonte: Technical Research Centre of Finland (1993).

Segundo Angamuthu et. al. (2004), os valores de tenacidade à fratura dinâmica, representada pelos parâmetros K_{Id} (MFEL), ou J_{Id} (MFEP) podem ser medidos utilizando-se corpos-de-prova pré-trincados. A tenacidade à fratura dinâmica pode ser definida como a resistência ao início de crescimento ou propagação de um defeito tipo trinca pré-existente na estrutura ou de um corpo-de-prova submetido à carga de impacto. O ensaio de impacto Charpy instrumentado é utilizado nos dias atuais para se validar a tenacidade à fratura dinâmica, devido a sua relativa simplicidade.

2.7 Métodos de obtenção dos valores de tenacidade à fratura dinâmica

Segundo Angamuthu et. al. (1999), desenvolveram dois métodos para a estimativa dos valores da tenacidade à fratura dinâmica, respectivamente para materiais exibindo comportamento intrinsecamente dúctil (J_{Id}) e essencialmente frágil (K_{Id}).

No primeiro método, quando o início da trinca ocorre antes do ponto de carga máxima, no escoamento generalizado do espécime, segundo Kobayashi, a mecânica da fratura elasto-plástica, (MFEP) é utilizada para avaliar o valor de J_{Id} , observando-se invariavelmente a ocorrência de uma fratura dúctil.

No segundo método, quando o início da trinca ocorre no pico de carga máxima, ou seja, na instabilidade, sem que se observe o escoamento generalizado, a mecânica da fratura linear-elástica (MFEL) é empregada para se estimar o valor de K_{Id} , quando uma fratura frágil é geralmente desenvolvida.

Ambos os métodos relatados acima foram desenvolvidos para atender a necessidade de obtenção de dados, com os ensaios monotônicos, mas como o advento desses métodos e estudos realizados por vários pesquisadores, esses conhecimentos que tem em sua essência um conceito de âmbito quase-estático, começou a ser aplicado na obtenção de dados utilizando os ensaios dinâmicos, para geração dos sinais primários (sinais dinâmicos).

No presente trabalho, foi aplicado os dois métodos descritos acima, numa tentativa de avaliar a eficiência e aplicabilidade de ambos.

2.7.1 Cálculo da tenacidade à fratura dinâmica elástica-linear, K_{Id} .

Para materiais exibindo um comportamento mecânico essencialmente frágil, quando o início do crescimento da trinca ocorre próximo ao ponto de carga máxima sem a curva P vs S apresenta um escoamento generalizado, o parâmetro K_{Id} é seguido por:

$$K_{Id} = \frac{6YM(a)^{0.5}}{BM^2} \quad (1)$$

$$Y = 1,93 - 3,07\left(\frac{a}{W}\right) + 14,53\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25,11\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25,8\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (2)$$

Onde:

K_{Id} é tenacidade à fratura pelo modo de deslocamento I dinâmico

M é o momento fletor aplicado $\equiv \frac{P_m S}{4}$

S é a distancia entre os pontos

Para corpos-de-prova do tipo flexão em 3 pontos em padrão Charpy do tipo pré trincados a uma razão de $\frac{a}{W} = 0,2$, o valor de K_{Id} pode ser estimado pela equação 3.

$$K_{Id} = 4,67P_m \quad (3)$$

Onde, P_m é o valor da carga máxima em kN.

E a segunda maneira de se calcular, que foi utilizada nesse trabalho foi usando a norma ASTM E399 – 90, cuja formulação e como foi obtida a carga utilizada para o calculo, está mostrada abaixo:

$$K_Q = \left(\frac{P_Q S}{BW^{3/2}}\right) * f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} [1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) * (1 - \frac{a}{W}) * (2,15 - 3,93 * \frac{a}{W} + 2,7 * \frac{a^2}{W^2})]}{2(1 + 2\frac{a}{W}) * (1 - \frac{a}{W})^{3/2}} \quad (5)$$

Onde:

K_{Id} é tenacidade à fratura pelo modo de deslocamento I dinâmico;

P_Q é a carga (força) candidata, (força de iniciação da propagação da trinca, $P_Q=P_5=F_{iu}$);

P_5 é a carga (força) onde ocorre a propagação de trinca (deformação plana);

F_{iu} é a força de iniciação da propagação de trinca;

B é a espessura do corpo-de-prova;

W é largura do corpo-de-prova;

a é o comprimento da trinca;

$f(a/W)$ é fator de forma utilizado pela E-399;

S é o vão livre (espaço livre existentes entre os apoios do corpo-de-prova).

O diagrama carga-COD pode ter varias formas, com é mostrada na Figura 14. A ASTM E-399 destaca três tipos principais de diagramas carga-COD.

Nas três situações, inicialmente o deslocamento de abertura de trinca aumenta linearmente com a carga. No caso ideal, curvas do tipo III, a fratura completa ocorre quando K_{IC} é atingida P_{max} coincide com a carga para iniciar o crescimento da trinca.

Na curva do tipo II, uma súbita propagação de trinca ocorre numa carga P_Q . Esta propagação de trinca frequentemente associada a um *click* audível, é denominada *pop in*. A ASTM E-399 admite a utilização da carga do *pop in* para calcular K_{IC} , desde que todos os requisitos estabelecidos sejam obedecidos. A Figura 13, mostra os tipos de curvas carga-COD, considerados pela norma E-399/90.

A curva do tipo I, expressa situação onde se observa um aumento gradual da não-linearidade no diagrama carga-COD, podendo essa ser proveniente de dois fatores, deformação plástica e propagação gradual da trinca que precede a fratura, assim pode-se definir P_Q , como a carga na qual ocorreu 2% da propagação da trinca.

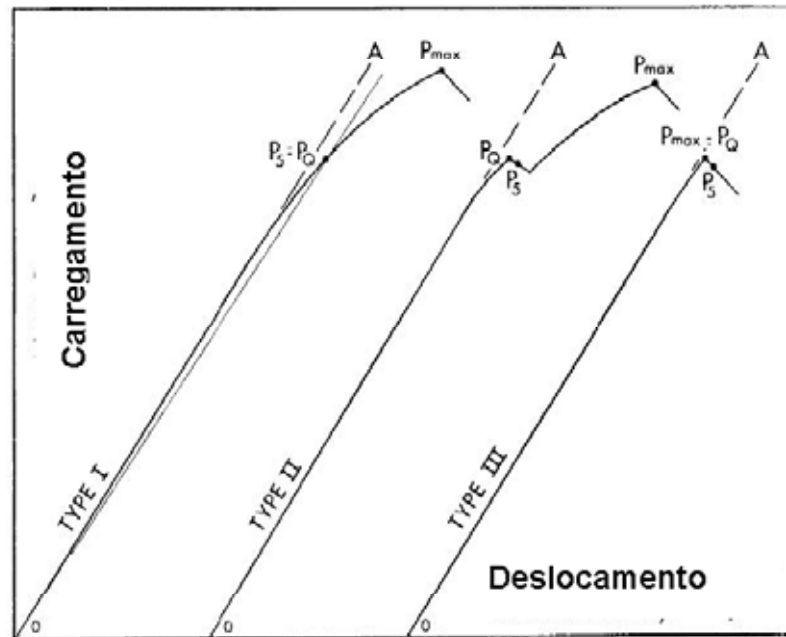


Figura 13 – Tipos de curvas carga-COD

2.7.2 Cálculo da tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástico, J_{Id}

De acordo com a Mecânica de Fratura Elasto-plástica, o ponto de iniciação da trinca deve ser detectado para avaliação da tenacidade à fratura dinâmica. Yamamoto e Kobayashi são pesquisadores da Toyohashi University of Technology (Japão) e precursores da metodologia para determinar o ponto de iniciação da trinca na curva Charpy instrumentada. Em 1993, eles desenvolveram um sistema de avaliação da tenacidade à fratura dinâmica auxiliada por computador, associando-o à máquina de ensaio Charpy convencional. Por meio deste sistema, denominado de *Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing - CAI* - foi possível determinar a tenacidade à fratura dinâmica, dada pelos parâmetros K_{Id} e J_{Id} , além das energias obtidas com base nas curvas força - deflexão, oriundas de corpos de prova Charpy-V pré-trincados. A metodologia para detecção da iniciação da trinca e determinação do J_{Id} consistia no uso da *taxa de alteração da flexibilidade* (CCR – compliance changing rate), Kruger (2005).

A CCR é definida desta forma,

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C - C_{el}}{C_{el}} \quad (6)$$

onde $\Delta C/C$ é a taxa de flexibilidade, C é a flexibilidade elástica aparente e C_{el} é a flexibilidade elástica e é definida da seguinte forma,

$$C_{el} = \frac{S_{el}}{P_{el}} \quad (7)$$

onde, s_{el} é ponto de escoamento no deslocamento e P_{el} é o carregamento correspondente ao escoamento.

Quando $\Delta C/C$ é expresso em função do deslocamento, subitamente surge um ponto de transição do gradiente na curva. Na Figura 14 mostra esquematicamente uma curva $\Delta C/C$ em função do deslocamento e os estágios da curva.

O princípio do Método da Taxa de Alteração da Flexibilidade é definido como: (i) na área da deformação elástica, a flexibilidade elástica do corpo-de-prova mantém-se constante e $\Delta C/C$ é zero. (ii) na área plástica, $\Delta C/C$ é aumentado por um incremento que depende do coeficiente de encruamento do material. (iii) quando a trinca inicia-se, o incremento de $\Delta C/C$ aumenta largamente devido a diminuição de seção do corpo-de-prova. O ponto de transição entre (ii) e (iii) é definido como ponto de iniciação da trinca, conseqüentemente determina-se a energia necessária para iniciar a trinca, E_i .

A partir da Equação 8 determina-se o valor de J_{Td} .

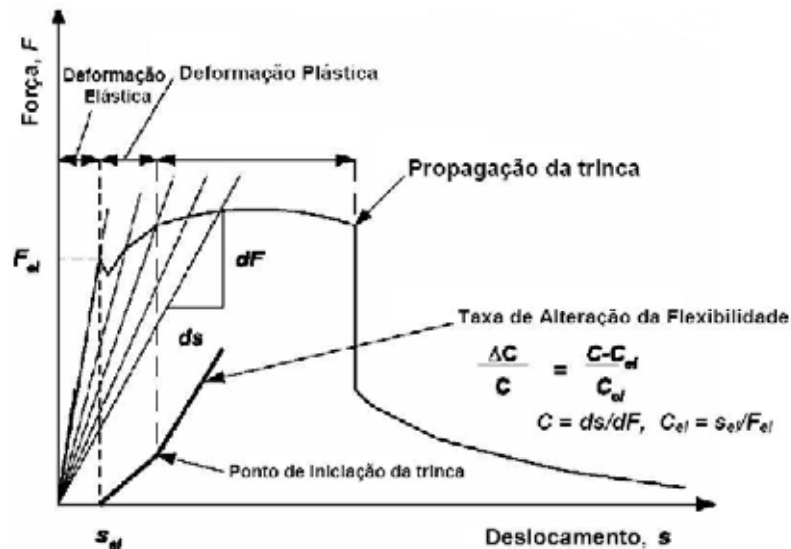


Figura 14 – Explicação esquemática do Método Taxa de Alteração da Flexibilidade.

Fonte: Yamamoto et. al. (1993).

Na avaliação da tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica, J_{Id} , Yamamoto et. al. utilizava a equação de Rice,

$$J_{Id} = \frac{2E_i}{B(W - a)} \quad (8)$$

Onde:

W é a largura do corpo-de-prova;

B é a espessura do corpo-de-prova;

a é o comprimento inicial da pré-trinca;

E_i é a energia necessária para a iniciação da trinca;

J_{Id} é a tenacidade à fratura do material na presença de uma trinca.

Os autores do método CCR desenvolveram no ano 1986, com o auxílio da concepção fundamental de Ernest e Paris (1979), uma metodologia para estimar o crescimento da trinca Δa . A metodologia denominada método da curva codificada (key curve method) era fundamentada na seguinte Equação 9,

$$\frac{PW}{b_0^2} = K \left(\frac{\Delta_{pl}}{W} \right)^n \quad (9)$$

Onde P é o carregamento, Δ_{pl} é a deflexão plástica, b_0 é o ligamento inicial ($W-a$), k e n são constantes. Os valores de k e n foram determinados ajustando a curva de carregamento-deflexão do corpo-de-prova. Nesta análise, o ajuste era limitado até o máximo ponto de deflexão, onde não havia uma extensão de trinca notável. Ambos os lados da Equação 9 foram alterados para uma escala logarítmica e os resultados foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados. A inclinação da curva ajustada é o valor n e a intersecção é o valor k . A faixa de ajuste foi alterada para o ponto de iniciação da trinca detectado pelo método CCR, e os valores de n e k também foram determinados para o caso de um corpo-de-prova pré-trincado por fadiga, Kruger (2005).

O método da curva codificada é baseado na suposição que a curva carregamento-deflexão com crescimento de trinca cruzará uma curva sem crescimento de trinca na relação a/W como esquematizado na Figura 15. A extensão da trinca é calculada a partir da equação a seguir,

$$\Delta a = W - \left(\left(\frac{PW^{n-1}}{K\Delta_{pl}^n} \right)^{\frac{1}{2}} + a \right) \quad (10)$$

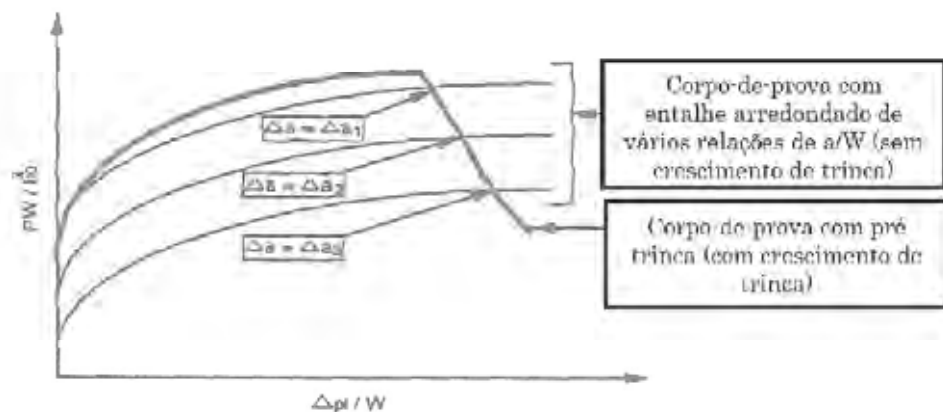


Figura 15 – Explicação esquemática do método da curva codificada (Δa representa a extensão da trinca). Fonte: Yamamoto et. al. (1993).

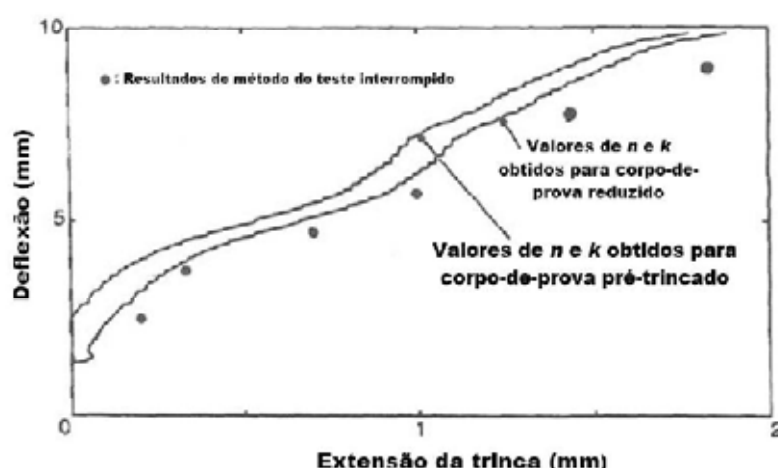


Figura 16 – Extensão da trinca em função da deflexão para corpos-de-prova Charpy (aço A533B) Fonte: Yamamoto et. al. (1993).

Para validar o método da curva codificada, Yamamoto et. al.(1993), comparou os resultados obtidos com os resultados do método do teste interrompido (stop block method). A Figura 16 mostra a extensão da trinca em função da deflexão do corpo-de-prova Charpy em aço A533B obtidos a partir do método de curva codificada e do método do teste interrompido. Nota-se que a extensão da trinca obtida em ambas metodologias são similares a partir do valor de extensão da trinca de 2 mm. Ademais, a curva de resistência à propagação da trinca, curva J-R, foi calculada a partir das Equações 8 e 9, para a curva de carregamento-deflexão de um corpo-de-prova pré-trincado, Kruger (2005).

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais Utilizados

Foi utilizado neste presente trabalho a variação do aço denominado ABNT 4340, de qualidade aeronáutica. A faixa de composição química em peso (balanço com Fe) está apresentado na Tabela 1, na Tabela 2 esta apresentado a composição química fornecida pelo fabricante e na Tabela 3 a composição química realizada no laboratório de ensaios de materiais – CT/Unicamp. O material foi recebido na forma de barra laminada de seção circular (ϕ 16mm), sem tratamento e sem acabamento .

Tabela 1 – Faixa de composição química (% em peso) de aços de baixa liga e ultra-alta resistência, normalmente utilizado na fabricação de componentes de aeronaves.

AÇO	C	Si	Mn	P,S*	Cr	Mo	Ni	V
4340	0,38-0,43	0,20-0,35	0,60-0,90	0,010	0,70-0,90	0,20-0,30	1,50-2,00	-----

Tabela 2 – Composição química do aço utilizado fornecida pela empresa Gerdal (Aços Finos Piratini)

AÇO	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
4340	0,42	0,26	0,73	0,025	0,008	0,78	0,23	1,74	0,21	0,017

Tabela 3 – Composição química realizada no laboratório de ensaios de materiais CT/Unicamp

AÇO	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
4340	0,43	0,18	0,76	0,027	0,007	0,74	0,33	1,66	0,19	0,017

O aço ABNT 4340 foi desenvolvido por volta de 1950 e começou ser usado comercialmente a partir de 1955.

Muitas propriedades do aço ABNT 4340 são similares às do aço 300M exceto que o aumento do teor de silício no aço 300M, permite um aumento de temperabilidade. O aço ABNT-4340 é um aço de ultra-alta resistência, que pode ser enquadrado na seguinte categoria

aço de baixa liga, junto com o aço 300M e pode ser considerado como um aço de alta temperabilidade.

3.2 Métodos Experimentais

3.2.1 Confeção dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova Charpy, para a realização dos ensaios monotônicos e de tenacidade à fratura, foram confeccionados a partir do material como recebido, tendo sido retirados das barras segundo a direção de laminação.

Devido à quantidade de material disponível, para os propósitos pretendidos, a confecção dos corpos-de-prova foi cuidadosamente planejada. A preocupação foi garantir um número mínimo de corpos-de-prova para cumprir o programa de ensaios previamente planejado.

Ao todo foram confeccionados 144 corpos-de-prova, 72 foram utilizados para ensaios monotônicos (Flexão em três pontos) e 72 para ensaios dinâmico (Charpy Instrumentado).

- **Corpos-de-prova de tenacidade à fratura (Charpy)**

Numa primeira etapa, amostras próximas das dimensões finais foram retiradas das barras através de corte em serra de fita. Posteriormente, essas amostras foram usinadas em plainas, torno e retifica plana universal, de modo a chegarem às medidas especificadas pelas normas ASTM E-23, e assim obteve os corpos-de-prova para o ensaio de tenacidade à fratura e monotônicos, em conformidade com as normas. Os entalhes foram feitos mecanicamente, com o auxílio de um dispositivo especialmente confeccionado para este fim (Brochadeira). Foi criado um gabarito para inspeção dos entalhes e controle dos mesmos, para garantir

uniformidade, e assim obter uma menor dispersão nas dimensões dos corpos-de-prova e nos resultados, que foram obtidos nos ensaios. Esses corpos-de-prova foram utilizados tanto para o ensaio dinâmico com para os de flexão de três pontos, sendo que os cdps utilizados nos ensaios monotônicos foram adaptados um dispositivo conhecido como rabo de andorinha, que tem como função a acoplagem do clipe-gage.

3.2.2 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos foram realizados em Campinas-SP (Unicamp), sob criteriosos requisitos de controle. Um forno com controle de subida de temperatura e atmosfera controlada (Banho de argônio) foi utilizado sob proteção nos corpos-de-prova para evitar a descarbonetação. Os corpos-de-prova já entalhados foram submetidos aos tratamentos térmicos e posteriormente, e foram confeccionadas as pré-trincas por fadiga, nos corpos-de-prova já pré-determinados. Os corpos-de-prova foram austenitizados a 1143 K, durante 1 hora em atmosfera inerte, e logo em seguida temperados em óleo agitado. Imediatamente após a têmpera, lotes de corpos-de-prova previamente selecionados foram revenidos nas temperaturas 473K, 573K, 673K e 773K, seguido de resfriamento em óleo, os métodos de controle microestrutural utilizados nessa etapa do trabalho estão ilustrados na Figura 17.



Figura 17 – Métodos de controle microestrutural utilizados nos corpos-de-prova, para melhorar a tenacidade à fratura do material

O forno e os aparatos periféricos utilizado para a realização desta etapa do trabalho, bem como especificações técnicas dos materiais utilizados nos tratamentos térmicos, podem ser visualizados através do desenho esquemático da Figura 18, na imagem digitais na Figura 19 e na Tabela 4.

Foi levanta uma curva de monitoramento da região de trabalho do forno, com termo par (curva Temperatura vs posição), a fim de saber como era a variação da temperatura longo do mesmo, e com isso determinar o perfil térmico e qual a região útil do forno, tal curva está ilustrada na Figura 20.

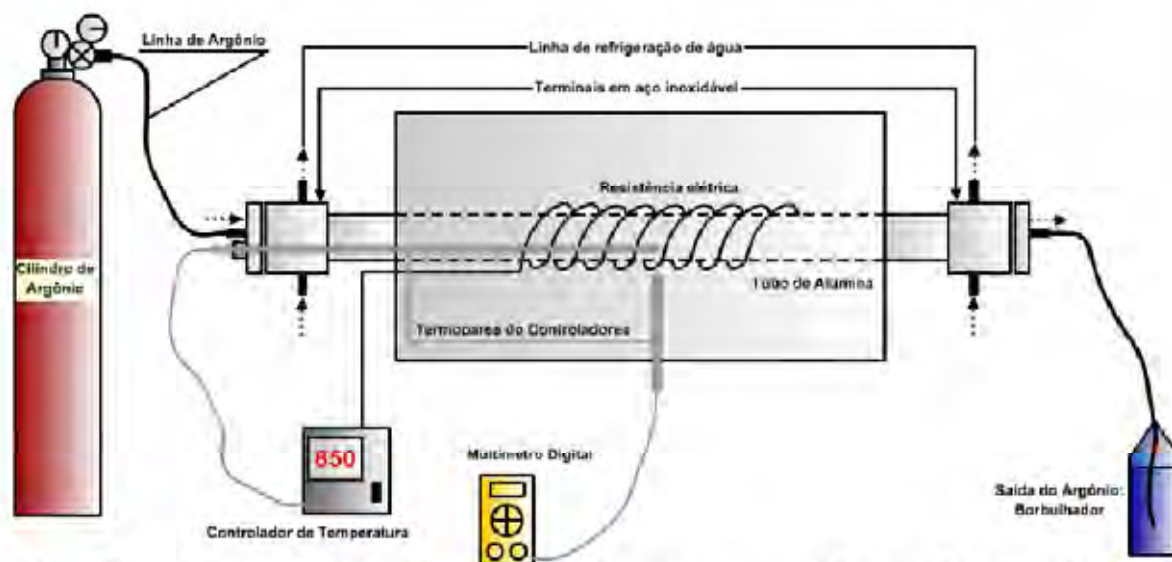


Figura 18 – Desenho esquemático do forno e dos aparatos periféricos de controle e funcionamento



Figura 19 – Imagem do forno e dos aparatos periféricos utilizados na realização dos tratamentos térmicos

Tabela 4 – Especificações técnicas dos materiais utilizados nos tratamentos térmicos.

Equipamento	Especificação Técnica
Forno Tubular	Marca: Marshall Furnace Modelo: 1137 Voltagem: 220 Volts
Controlador de Temperatura	Marca: Novus Modelo: N1100 Rele de estado sólido: 40 Amperes
Multímetro Digital	Marca: Minipa Modelo: ET-2042
Óleo para tempera	Marca: Castrol Modelo: GTX SAE 20W/50 Quantidade: 20litros
Termopar interno	Marca: Consistec Modelo: Tipo K, Inconel, diâmetro de 3mm, comprimento de 500mm.
Termopar externo	Marca: Consistec Modelo: Tipo K, Inconel, diâmetro de 3mm, comprimento de 200mm.
Argônio	Fornecedor: White Martins Ltda Modelo: 5.0 Analítico Quantidade: 10,0m ³

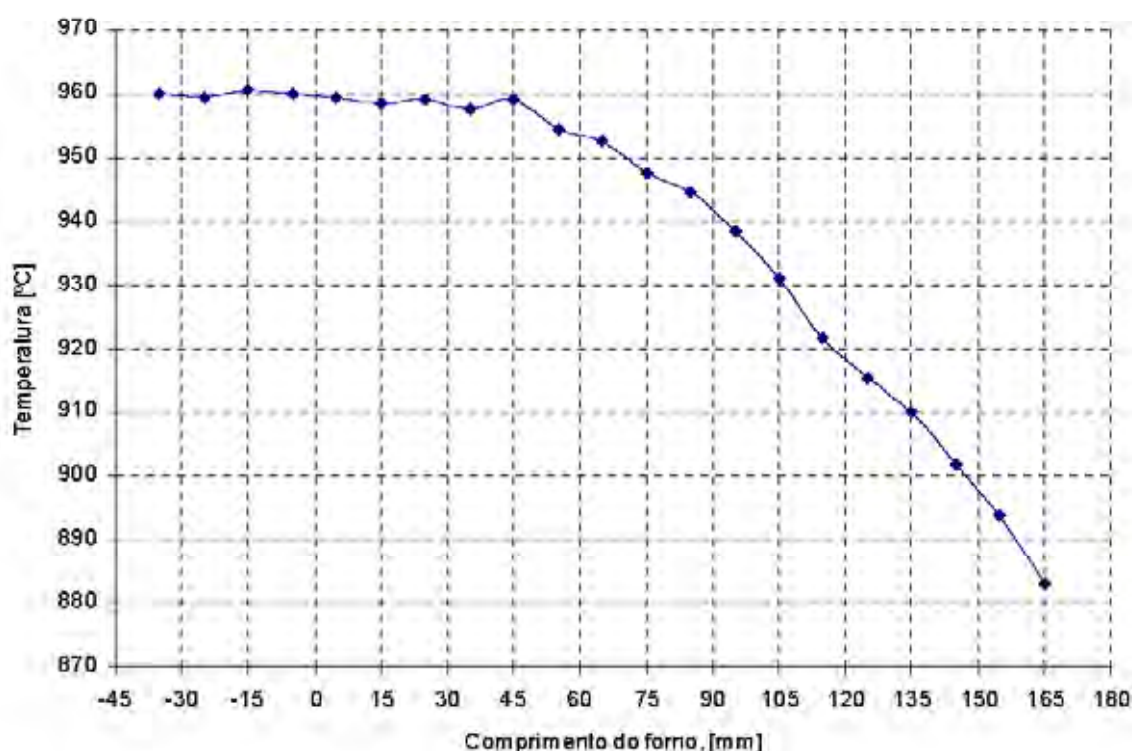


Figura 20 – Perfil térmico da região de trabalho do forno

Após os tratamentos térmicos parte dos corpos-de-prova, os que tem entalhe agudo, foram pré-trincados por fadiga em conformidade com metodologia apresentada na seção 4.2.3.

- **Tratamento Térmico de Austenitização**

Os corpos-de-prova foram submetidos à temperatura de austenitização, 1143 K (Temperatura convencional), onde cada lote contendo 12 corpos-de-prova, ficaram 20 minutos em banho de argônio, para garantir uma atmosfera inerte, no interior do forno. Logo após foi submetido à 1 hora e 15 minutos, do tempo total, foi de subida da temperatura (rampa de temperatura), tal tempo foi monitorado pelo controlador digital de temperatura e mais 1 hora de encharque, contabilizando assim um tempo total de tratamento de 2 horas e 40 minutos, para cada lote, como mostrado na Figura 21.

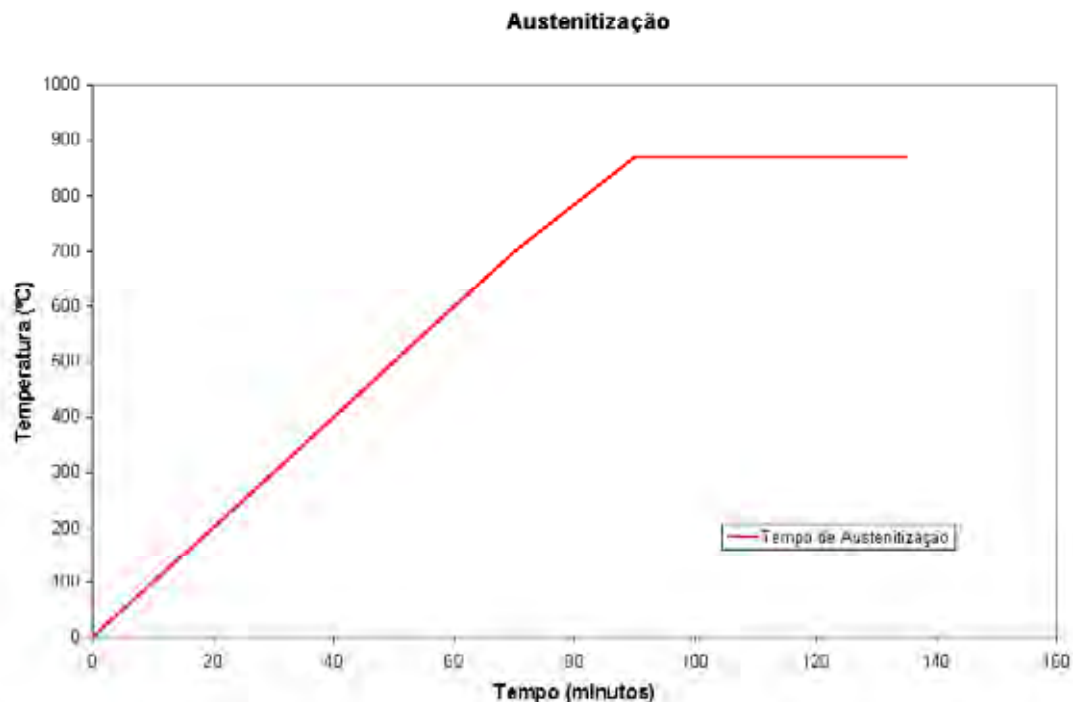


Figura 21 - Tratamento térmico de Austenitização, tempo de permanência dos corpos-de-prova no interior do forno, com suas respectivas temperaturas

- **Tratamento Térmico de Têmpera**

O procedimento consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à temperatura crítica em um meio como o óleo, água, ou outro qualquer, o objetivo precípua é a obtenção da estrutura martensítica e sempre evitando a transformação dessa em austenita.

Nesse trabalho depois de devidamente austenitizado, os corpos-de-prova foram temperados e o meio utilizado para tal procedimento foi o óleo, como recomendado pela literatura.

- **Tratamento Térmico de Revenido**

O procedimento sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzida por esta; além de aliviar ou remover tensões internas, corrige as excessivas durezas e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resiliência.

Como foi relatado anteriormente muitos cuidados foram tomado na etapa dos tratamentos térmicos, pois é sabido que o aço ABNT 4340 (aços baixa ligas) deve ser cercado de vários cuidados.

Neste trabalho o tratamento de revenido seguiu o procedimento de duplo revenido com 1 hora + 1 hora de duração, foram realizados nas temperaturas 473K, 573K, 673K e 773K; sempre com resfriamento em óleo. A seguir é mostrada na Figura 22 a curva contendo a rampa de aquecimento e cada temperatura de revenido utilizada no tratamento térmico dos corpos-de-prova.

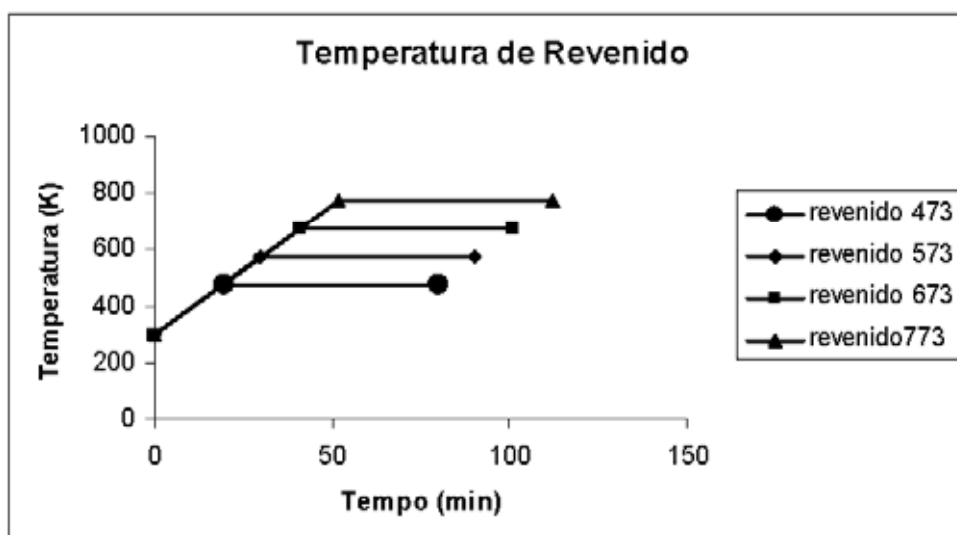


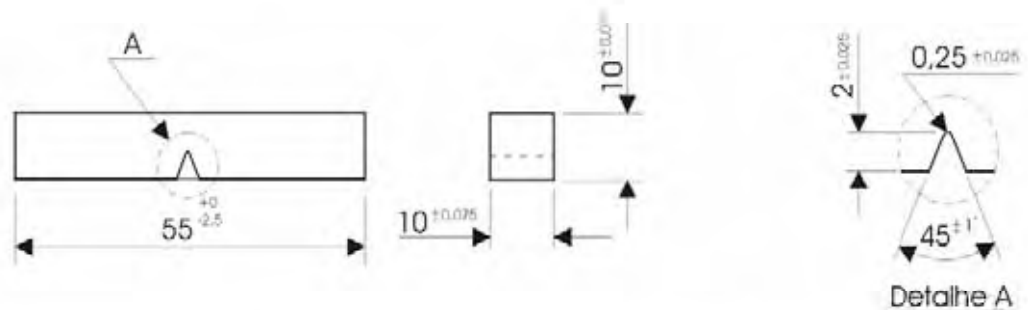
Figura 22 – Curva da rampa de aquecimento e temperatura de revenido

3.2.3 Metodologia para obtenção da Pré-trinca por fadiga nos corpos-de-prova

Como especificado anteriormente, dois tipos de corpos-de-prova fez parte dos ensaios deste trabalho. O propósito da confecção desses diferentes corpos-de-prova, consiste no volume de material submetido ao carregamento, seja ele, dinâmico pelo ensaio Charpy, ou estático pelo ensaio flexão em três pontos.

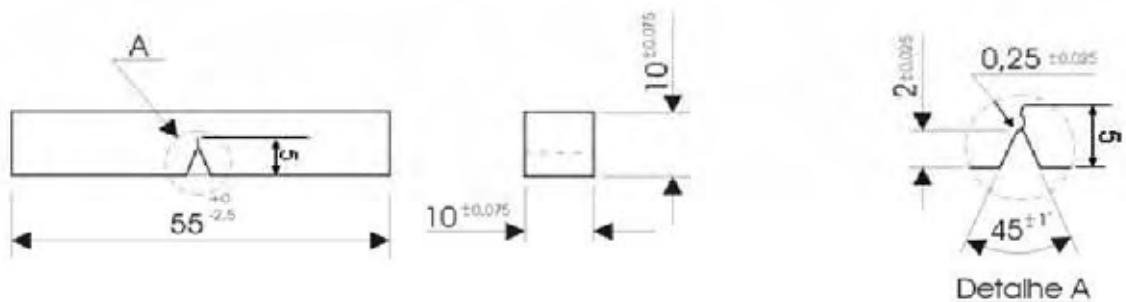
Os corpos-de-prova para ensaio Charpy, em conformidade com norma ASTM E 23, possuem as dimensões 10x10x55mm com entalhe de 2,0mm de profundidade e 0,25mm de raio de ponta, como ilustra a Figura 23.

Os corpos-de-prova com pré-trinca na raiz do entalhe, tiveram as mesmas dimensões que os corpos-de-prova do ensaio Charpy, porém a trinca aguda junto com o entalhe arredondado tem 5,0mm de profundidade. A Figura 24 ilustra o corpo-de-prova munido com a pré-trinca na raiz do entalhe.



Acabamento Superficial: 2 μ m na superfície do entalhe e no lado oposto e 4 μ m nas outras superfícies
Tolerância geométrica nas superfícies da seção transversal: 90°^{+1.0}

Figura 23 – Corpo-de-prova Charpy normalizado pela ASTM E-23.



Acabamento Superficial: 2 μ m na superfície do entalhe e no lado oposto e 4 μ m nas outras superfícies
Tolerância geométrica nas superfícies da seção transversal: 90°^{+1.0}

Figura 24 – Corpo-de-prova com pré-trinca na raiz do entalhe.

Para gerar a trinca por fadiga na raiz do entalhe, os corpos-de-prova foram solicitados por flexão em uma máquina MTS modelo 810 de capacidade 25t, do Laboratório de Propriedades Mecânicas do DEMA/FEM/UNICAMP. O controle sobre a propagação da pré-trinca por fadiga seguiu as providenciais abaixo:

- ✓ *as superfícies dos corpos-de-prova foram polidas para facilitar a observação da nucleação e crescimento da pré-trinca por fadiga;*
- ✓ *uma Lupa com dispositivo de iluminação próprio foi utilizada para facilitar a observação do crescimento da pré-trinca por fadiga, bem como permitir a medição preliminar de seu comprimento.*

Para acelerar a nucleação e o crescimento da pré-trinca foram utilizados dois estágios de propagação da trinca em parceria com três cargas de carregamento.

- ✓ *No primeiro estágio a nucleação e a propagação das pré-trincas foram feitas por intermédio de cargas mais elevadas.*
- ✓ *No segundo estágio foi feito um controle mais eficaz sobre o crescimento da pré-trinca, através da redução do nível de carregamento (carregamento intermediário e mínimo), de modo a obedecer às recomendações da norma.*

Para acelerar (reduzir o tempo) a propagação da trinca é interessante trabalhar com a maior frequência possível. Devido a fatores inerciais, quando se aumenta em demasia a frequência perde-se o controle dos níveis de carregamento. Mas para facilitar a observação da pré-trinca é interessante abaixar a frequência no momento de se estimar o comprimento. Este problema também poderia ser resolvido com a utilização de uma luz estroboscópica. Nos momentos finais de crescimento da pré-trinca é interessante reduzir a frequência, para ter maior controle sobre o crescimento da mesma.

Uma outra providência para reduzir o tempo de nucleação da pré-trinca foi utilizar dois estágios de propagação de trinca. Estes dois estágios foram delimitados por risco de referencia,

concebidos por intermédio de um paquímetro de altura com ponta de traçagem, como mostra a Figura 25, a representação esquemática dos dois estágios de crescimento da pré-trinca por fadiga.

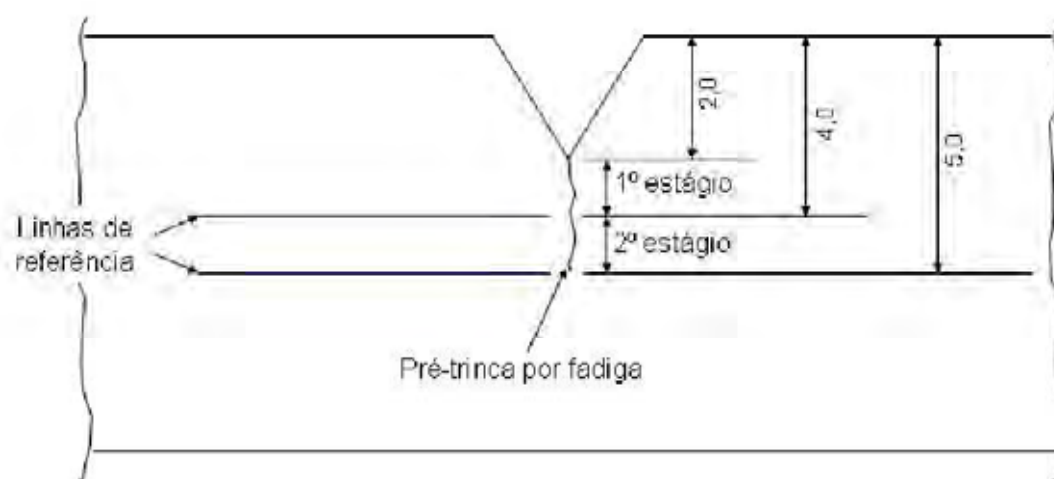


Figura 25 - Representação esquemática dos dois estágios de crescimento da pré-trinca por fadiga.

Com a adoção dessas providências o tempo de confecção de cada pré-trinca consumiu de 30 à 40 minutos, dependendo da condição de tratamento térmico. A condição mais crítica para controle das pré-trincas, foi a como-temperadas. Nesse caso, os níveis de carregamento foram sempre menores quando comparados com as demais condições.

As condições de carregamento para confecção da pré-trinca por fadiga foram definidas com base nas recomendações das normas ASTM E-1290/89 e E-399/90. Os valores de carga e frequência para obtenção da pré-trinca, encontra-se nas Tabela 5.

O comprimento inicial da trinca, a_0 , usados no modelo matemático, foi obtido após os ensaios de impacto pela ruptura completa dos corpos-de-prova, como ilustrada na Figura 26, cujas medições sobre a superfície foram realizadas com o auxílio de um microscópio universal.

Tabela 5 – Valores de carga e frequência para obtenção da pré-trinca

Tratamento Térmico (K)	1° Estágio		2° Estágio				Frequência (Hz)
	$P_{\max}$ (N)	$P_{\min}$ (N)	$P_{\max}$ (N)	$P_{\min}$ (N)	$P_{\max}$ (N)	$P_{\min}$ (N)	
CRE	6000	600	4500	450	3000	300	25
CT	5000	500	3000	300	2000	200	10
473	6000	600	4000	400	3000	300	15
573	6000	600	4000	400	---	---	15
673	6000	600	4000	400	---	---	15
773	6000	600	4000	400	---	---	25

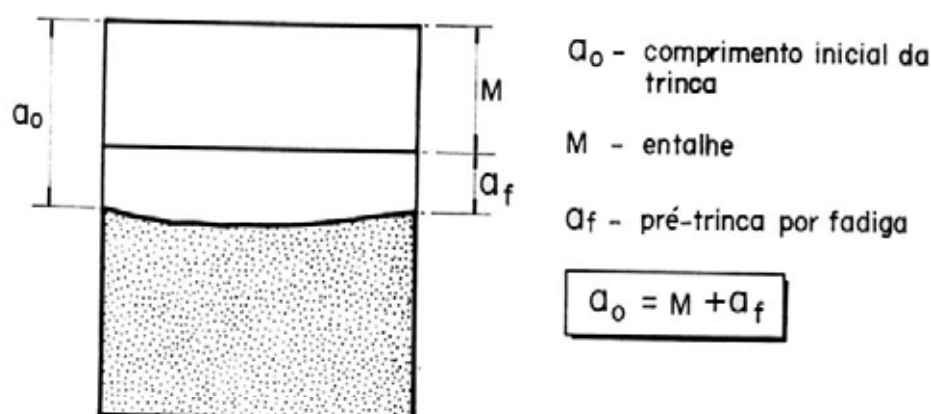


Figura 26 – Modelo esquemático da superfície de fratura do corpo-de-prova Charpy, após o ensaio de impacto.

3.2.4 Ensaio de Dureza

As medidas de dureza foram efetuadas em uma máquina de dureza Leco Digital modelo RT-240, do DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS, AERONÁUTICA E AUTOMOBILÍSTICA – EESC-USP, com carga de 150 Kgf. Segundo recomendações observadas na NBR 6672/81, os valores de dureza utilizados foi o da escala de dureza Vickers e HRC.

Os valores de dureza definitivos foram obtidos pela média aritmética de no mínimo cinco medidas efetuadas sobre a superfície polida dos corpos-de-prova, nas cinco condições de microestrutura, obtidas pelos ciclos térmicos (como temperado e revenido à 473K, 573K, 673K e 773K). Os dados finais de todas as medidas realizadas, estão apresentado e discutidos em Tabelas e Figuras na seção 5.

3.2.5 Ensaio Charpy Instrumentado e Monotônicos

Os ensaios de impacto foram realizados à temperatura ambiente, em um sistema de ensaio PW30 instrumentado e informatizado de impacto *Instron Wolpert*, do DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS, AERONÁUTICA E AUTOMOBILÍSTICA – EESC-USP.

O sistema fornece curvas força x tempo, força x deslocamento, energia de impacto x deslocamento, deslocamento x tempo e velocidade x tempo, como também fornece de força, deslocamento, tempo e energia nos eventos de deslocamento global, carga máxima, no início de freamento de trinca frágil e instável.

A velocidade inicial utilizada para o impacto do martelo no ensaio foi de 5,52 m/s com um fundo de escala de 300 J. A seguir é ilustrada na Figura 27, imagem geral da máquina *Charpy Instron Wolpert*, onde foram realizados os ensaios de impacto, e na Figura 28, mostrada um exemplo das curvas gerada pela máquina gerada durante o ensaio Charpy Instrumentado do aço ABNT-4340, na condição de revenido a 473K, com entalhe arredondado e a Figura 29, mostra exemplo de curva carga x deslocamento x energia, gerada pela máquina gerada durante o ensaio Charpy Instrumentado do aço ABNT-4340, na condição de revenido a 673K, com entalhe arredondado.



Figura 27 – Foto geral da máquina Charpy Instron Wolpert.

Foram ensaiados 64 corpos-de-prova, nos ensaios de impacto, sendo estes divididos igualmente entre entalhe arredondado (32cdps) e pré-trincados (32cdps). Esses lotes ainda são divididos nas cinco condições de microestruturas já relatadas anteriormente, tendo um total de aproximadamente seis corpos-de-prova para cada tipo de entalhe e condição microestruturais.

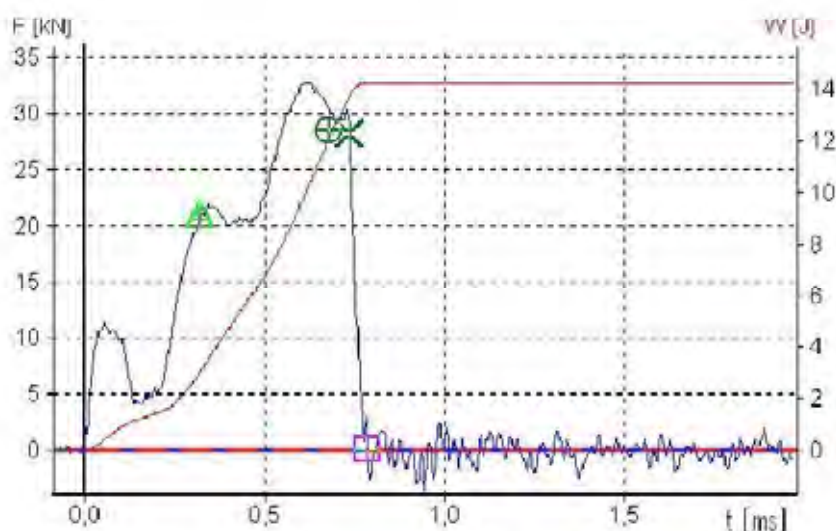


Figura 28 – Exemplo de curva carga x tempo x energia, gerada pela máquina gerada durante o ensaio Charpy Instrumentado do aço ABNT-4340, na condição de revenido a 473K, com entalhe arredondado.

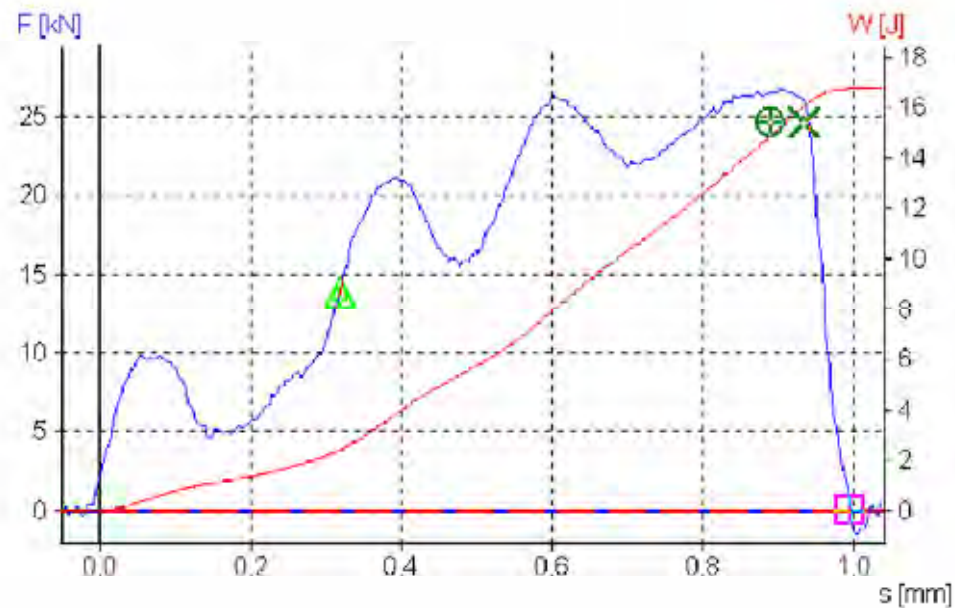


Figura 29 – Exemplo de curva carga x deslocamento x energia, gerada pela máquina gerada durante o ensaio Charpy Instrumentado do aço ABNT-4340, na condição de revenido a 673K, com entalhe arredondado.

Onde:

Δ é o ponto de carga de escoamento global

$\oplus$ é o ponto de carga máxima

X é o ponto de início de propagação instável da trinca

Os ensaios monotônicos (flexão em três pontos), foram realizados em Campinas na Unicamp no Laboratório de ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica, à temperatura ambiente, em uma máquina MTS-810s, foram ensaiados corpos-de-prova nas mesmas condições que os de impacto instrumentado, isso foi realizado intencionalmente p podermos cruzar os resultados e realizar possíveis comparações entre os resultados dos dois tipos de ensaio.

3.2.6 Rotina computacional para processamento dos sinais do ensaio Charpy Instrumentado

Esta rotina computacional foi desenvolvida na linguagem de programação do Matlab, pelo pesquisador Rodrigues em junho de 2003, junto ao DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS, AERONÁUTICA E AUTOMOBILÍSTICA – EESC-USP, e foi desenvolvido para materiais de características dúcteis e frágeis. A rotina computacional se baseia nos dois métodos propostos por Angamuthu (1999) e pela ASTM E-399/90, citado na seção 3, no cálculo da média móvel para filtragem das oscilações encontradas nos sinais, das curvas força x deslocamento. Essa filtragem é feita porque fica difícil distinguir as origens dessas oscilações, pois na maioria das referências, esse tipo de comportamento dos sinais estão associados a oscilações inerciais. Segundo Rodrigues et.al. (2001), essas oscilações podem conter várias combinações, tais como avanço de trinca, efeitos do processo de deformação, ou mesmo originado pelo impacto das partes envolvidas.

A rotina computacional nos dá duas opções de sequência, sendo elas denominadas Frágil, onde é apresentado no término do polimento a curva polida a indicação do ponto de força máxima, cujo valor é utilizado para o cálculo de K_{Id} , dada pelo princípio da Mecânica da fratura elástica linear, e na segunda opção Dúctil onde após a apresentação do término do polimento da curva, a rotina computacional pede a definição da flexibilidade e imediatamente fornece os valores de força máxima, início de propagação de trinca e de escoamento e os valores de energia utilizados para o cálculo de J_{Id} dados pelo conceito da Mecânica elasto plástica.

- **Utilização do programa computacional para processamento dos sinais do ensaio Charpy Instrumentado**

A aplicação deste programa tem como objetivo a determinação dos valores de carga e energia de início de propagação da trinca, visando à análise das curvas força vs deslocamento, levantadas pela rotina computacional, das diversas microestruturas do aço ABNT-4340, obtidas com os ciclos térmicos. Todas as microestruturas obtidas foram analisadas pelo critério elasto-plástico, onde se leva em consideração todas as características frágeis e dúcteis.

Como a rotina computacional na sua opção elasto-plástica detecta início de propagação de trinca dúctil, que ocorrem entre os pontos de escoamento generalizado e de carga máxima, e a rotina computacional, na sua opção elasto-linear, fornece somente o valor de carga máxima, optou-se pela primeira opção elasto-plástica, pois é mais abrangente, leva em consideração todas as possibilidades e seu embasamento teórico é bem robusto.

Quanto ao processo de filtragem, foram utilizadas para cada corpo-de-prova, cada tipo de microestrutura e cada tipo entalhe, vários tipos filtragens visando encontrar a resposta mais aproximada entre o sinal dinâmico com o monotônico e após alguns testes e análises visuais, evitando uma filtragens, o que poderia levar a uma distancia da trajetória original da curva, atenuação da força.

Foram feitas algumas modificações na rotina computacional original, apenas para obtenção de dados complementares (Geração do arquivo de pontos da curva força x deslocamento), para geração dos resultados e adaptação da rotina a alguns arquivos particulares, por exemplo os arquivos dos ensaios monotônico, também foi introduzido novas equações para o cálculo de K_{Id} (K_Q), equações extraídas da norma ASTM E-399/90 e de artigos como a do Angamuthu et. al. (1999) . Para o processamento correto desse arquivo, a rotina computacional teve que passar por algumas modificações em sua linha de comando,

mas estas foram apenas para adaptar a rotina computacional para leitura e vetorização dos dados do arquivo, pois os arquivos monotônicos tinham algumas características particulares.

As etapas para a execução do programa são descritas abaixo:

1. os pontos de carga-deslocamento registrado pelo programa Instron em forma de planilha Excel foram transformados em arquivos TXT;
2. o arquivo TXT foi lido pela rotina gerada no programa Matlab, com isso abriu a primeira janela, pedindo que insira o tipo de material correspondente para o arquivo;
3. após indicar qual material, a rotina disponibiliza uma segunda janela, onde se deve indicar quais as características do material, se é dúctil ou frágil. Em seguida uma terceira janela se abre para q seja estipulado o número de filtragem, caso a filtragem seja necessária;
4. após todas essas configurações iniciais, é disponibilizada a quarta janela avisando se há necessidade de mais filtrações.
5. em sequência, o programa pede que seja marcado dois pontos na região onde se apresenta a região linear do sinal (reta). Em seguida o programa amplia a região não linear (plástica) e disponibiliza um display para que seja marcado quatro pontos, dois primeiros (denominados reta 1) e os dois últimos (denominados reta 2), essa etapa é realizada para a determinação do ponto de iniciação de trinca;
6. em seguida, o programa apresenta as curvas de carga-deslocamento comparando o sinal real com o filtrado, o ponto de carga de escoamento, carga de iniciação de trinca e carga máxima e a taxa de variação de flexibilidade;
7. na sequência apresenta os valores de K_{Id} e J_{Id} , todos esses valores podem ser mostrados direto na tela do computador ou ainda podem ser salvos em forma de arquivo TXT.

3.2.7 Metodologia empregada para filtragem de sinais

Como podemos ver na seção 3.2.6, a rotina computacional utilizada para gerar e processar os dados apresentados nesse trabalho, o polimento ou filtrações das curvas foram feitos pelo método de média móvel e explicação para a utilização dessa filtragem é porque seria muito dificultoso a produção de um algoritmo que filtra-se o sinal pela frequência, pois por causa das características do sinal (sinal transiente), seria difícil saber diferenciar quais frequências seriam ruídos e quais seria o sinal real, já que esse tipo de sinal contém todas as frequências em seu espectro. Esse tipo de filtragem pela média móvel é de simples entendimento, o que é feito é apenas uma média simples e pontual entre os valores lidos naquele intervalo pré-definido, os resultados são bons quando o tipo de sinal é simétrico, mas quando o sinal não segue uma simetria os resultados tendem a se deteriorarem, de acordo com a quantidade de filtragem que for realizada, e com isso há uma perda muito grande de informações no sinal.

Com isso foi proposto nesse trabalho a tentativa de realizar esse tipo de filtragem pela frequência, utilizando algumas ferramentas do *MatLab* o *Wavelet Toolbox Main Menu*, cuja as Figuras 30, Interface primária do programa *Wavelet Toolbox Main Menu*, Figuras 31, Interface secundária do *Wavelet Toolbox Main* (visualização da filtragem do sinal), Figuras 32, Interface terciária do *Wavelet Toolbox Main* (filtragem do sinal, retirada dos ruídos, utilização dos filtros passa-alta e passa-baixa) e Figuras 33, Confrontação do sinal filtrado e do sinal bruto.



Figura 30 - Interface primaria do programa *Wavelet Toolbox Main Menu*.

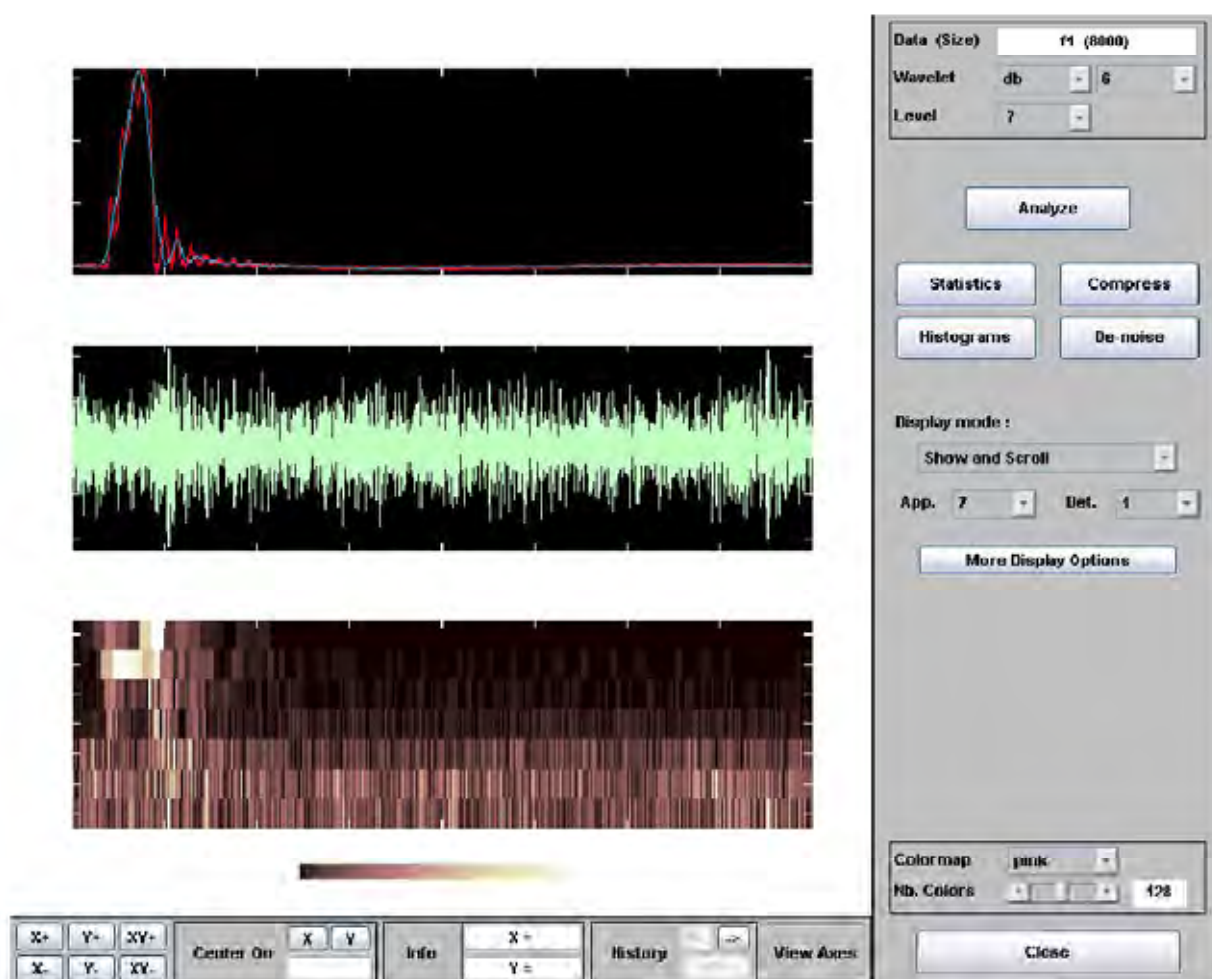


Figura 31 - Interface secundária do *Wavelet Toolbox Main* (visualização da filtragem do sinal).

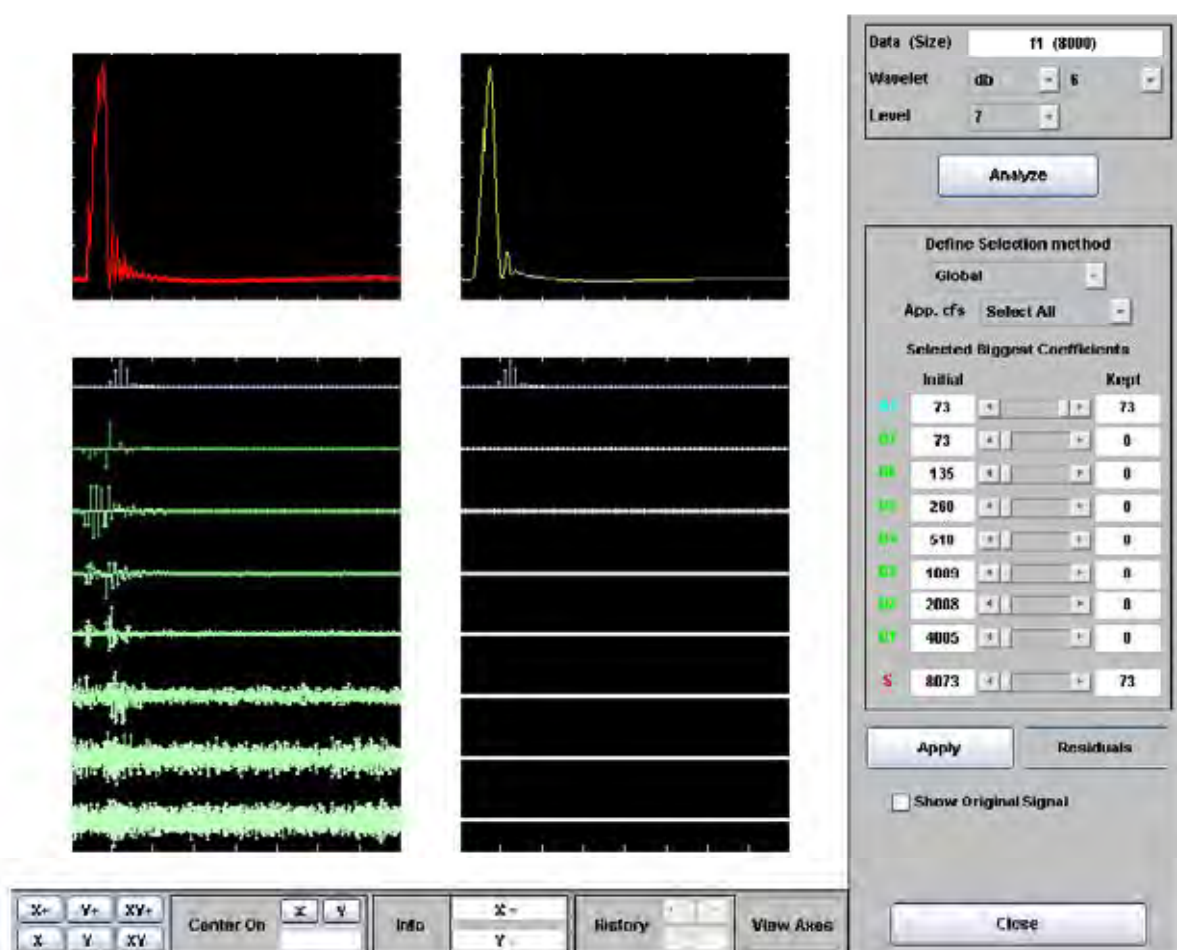


Figura 32 - Interface terciária do Wavelet Toolbox Main (filtragem do sinal, retirada dos ruídos, utilização dos filtros passa-alta e passa-baixa).

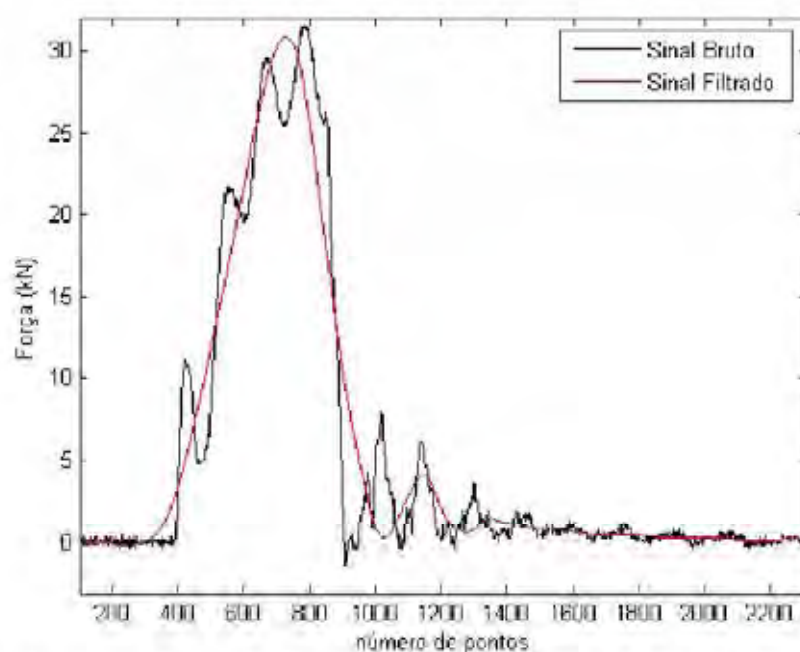


Figura 33 - Confrontação do sinal filtrado e do sinal bruto, aço ABNT-4340 revenido a 773 K.

Esta ferramenta tem como função filtrar sinais de qualquer origem, pela sua frequência, utilizando para isso alguns filtros conhecidos como passa-alta e passa-baixa.

Assim foi filtrado todos os sinais utilizando essa ferramenta, e posteriormente esses sinais foram utilizados para obter os dados de energia global, K_{Id} , J_{Id} , força máxima (F_m), força de escoamento generalizado (F_{gy}), força de iniciação da trinca (F_{in}). Para obtenção dessas grandezas citadas anteriormente, foi utilizado a mesma rotina computacional descrita na seção 4.2.6, mas não utilizou-se o polimento pela média móvel, pois o sinal já vem sem ruídos e ondulações.

Todos esses dados foram confrontados entre si, para ver se ocorreram algumas diferença e esses mesmo dados foram comparados com os dados do ensaio monotônico que também foram processados pelo programa computacional e calculados diretamente pela norma ASTM E-399, estes tomados como referencias por causa de suas características mais comportadas e por causa de seu embasamento teórico mais consolidado e consagrado.

4 Resultados e Discussões

4.1 Considerações iniciais

Foi utilizado nesse trabalho o aço denominado ABNT-4340, de qualidade aeronáutica, cuja composição química esta apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3, na seção 4.1.

Para feitura deste trabalho foram confeccionados diversos corpos-de-prova e lotes predefinidos destes foram submetidos a distintos ciclos térmicos. As variáveis de controle foram, temperatura de austenitização de 1143 K, atmosfera de forno, meio de resfriamento e temperatura de revenido.

Os diferentes ciclos térmicos proporcionaram diferentes microestruturas, e consequentemente o comportamento mecânico diferenciado. O comportamento mecânico e característica das fraturas foram analisados com base nas informações obtidas a partir de ensaios mecânicos monotônicos e dinâmicos.

Os dados provenientes do ensaio Charpy Instrumentado, são sinais força x tempo e força x deslocamento, esse sinais muito difíceis de serem interpretados no primeiro instante de sua aquisição, isso devido ao ruído e ondulação intrínsecas ao processo de aquisição do mesmo. Para o melhor entendimento, interpretação e ratificação do sinal dinâmico, foi proposto trabalhar como base de comparação a energia global, como primeira base de ratificação do sinal e para melhor entendimento e interpretação do sinal é utilizado o ensaio monotônico e toda teoria da mecânica da fratura.

Como já é sabido, existem duas maneiras pelas quais é possível ratificar os resultados obtidos pelo ensaio Charpy Instrumentado. Uma das maneiras, que foi utilizada nesse trabalho, conhecida como ensaio monotônico, ou também conhecida como Quase-Estática,

essa forma de ensaio diz respeito à relação existente entre as forças máximas medidas monotonicamente e dinamicamente, nas mesmas condições experimentais do ensaio Charpy.

Uma outra maneira possível de ratificar os resultados do ensaio dinâmico é relacionar à correspondência entre os valores de energia global medidos convencionalmente pela máquina Charpy, lida em seu dial analógico, e os calculados numericamente, tomando-se por base os sinais medidos pelo sistema de aquisição acoplado na máquina. Esse segundo método só serviu para ratificar os resultados obtidos qualitativamente.

Vão ser estudadas como influencia no processo à fratura do aço estrutural ABNT-4340, as variáveis:

- ✓ Tratamento Térmico: como-recebido, como-temperado e revenido (473 K, 573 K, 673 K e 773 K);
- ✓ Raio de Ponta de Entalhe: entalhe arredondado (raio de ponta 0,25) e trinca aguda (entalhe + pré-trinca = 5mm);
- ✓ Taxa de Carregamento: ensaios monotônicos (MTS) e de impacto (Charpy Instrumentado *Instron Wolpert* velocidade de impacto 5,5 m/s);
- ✓ Forma de Tratar o Sinal (filtragem): máquina/GC3M (média móvel, *wavelets*) e *Instron Wolpert* (“Avaliação ISO”).

A apresentação e discussão do trabalho está concentrada na caracterização mecânica do aço ABNT-4340, sendo esta caracterização, dividida em ensaios de dureza, ensaio Charpy Clássico, ensaio de tenacidade à fratura (monotônico) e ensaio de tenacidade à fratura dinâmica (Charpy Instrumentado), como mostra a seguir:

Como avaliação da influência dos ciclos térmicos no comportamento mecânico do material, realizou-se vários tipos de ensaios, sempre na temperatura ambiente. Foram utilizados tabelas e gráficos para apresentação dos resultados, e para expressar a variação das

propriedades em função da temperatura de revenido, têmpera, raio de ponta (arredondado e agudo) e taxa de carregamento.

4.2 Ensaio de Dureza

A influência dos tratamentos térmicos nos valores de dureza, do aço ABNT-4340, está apresentada, na Tabela 6 e na Figura 34.

E primeiro lugar a determinação da propriedade de dureza resultante das condições do tratamento térmico, foi para atestar e ratificar o grau de controle e qualidade dos tratamentos térmicos realizados. Foram feitas seis medidas e cada corpo-de-prova e dessas medidas foram calculadas as médias aritméticas e foram esses resultados usados para análises.

Tabela 6 – Valores de dureza, resultantes das diferentes condições de tratamento térmico.

Aço ABNT 4340 / Austenitizado 1143 K / Resfriado a Óleo			
Condições de Tratamento Térmico		Dureza HRC	Dureza Vickers
Como-Recebido		39,2(1,7)*	385,2(13,5)*
Como-temperado		59,1(0,9)	708 (33,3)
Temperatura de Revenido (K)	473K	56,4(0,2)	622,1(4,1)
	573K	52,7(0,3)	555,4(4,4)
	673K	47,9(0,3)	484,1(3,5)
	773K	43,2(0,2)	424,8(2,6)

*Desvio Padrão

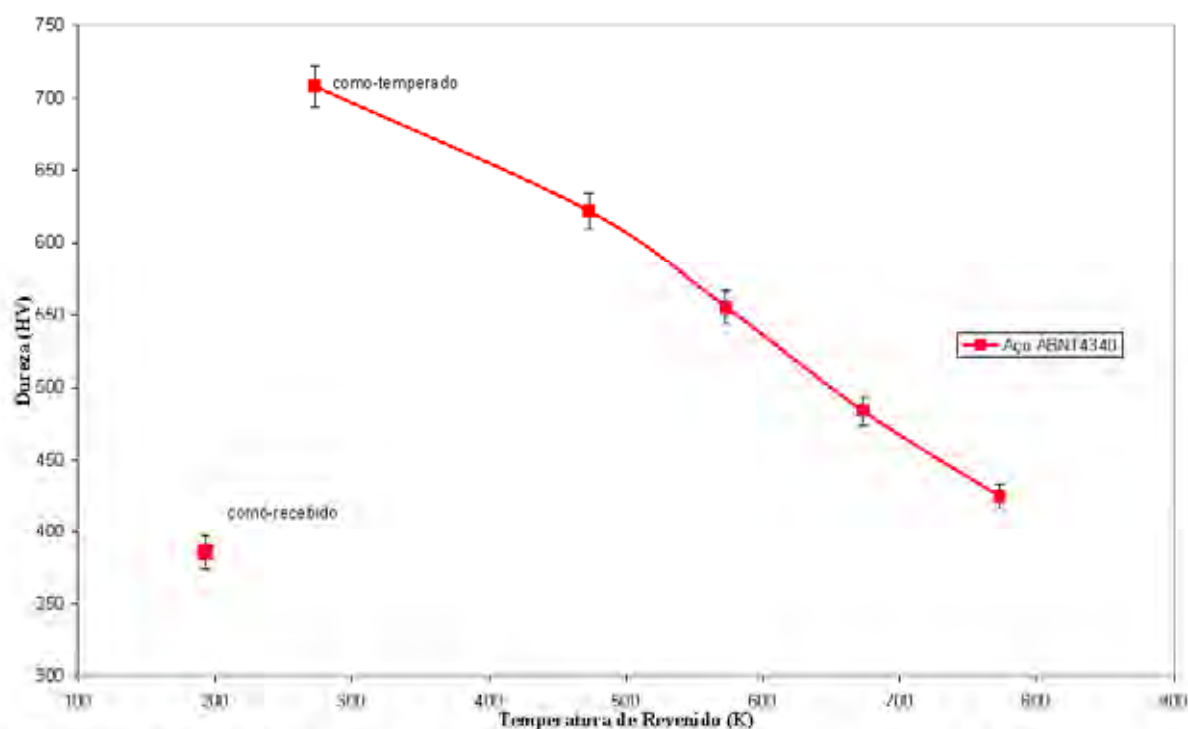


Figura 34 – Influência da temperatura de revenido na dureza do aço ABNT-4340.

Conforme pode ser comprovado na Tabela 6 e Figura 34, com o aumento da temperatura de revenido a dureza do material foi diminuindo, isso ocorreu porque na verdade com o aumento da temperatura de revenido da matriz, ocorre uma diminuição do endurecimento por solução sólida da matriz devido a formação de carbonetos, assim a matriz tende a voltar em seu estado de equilíbrio e com isso melhorando a sua ductilidade.

O amolecimento da matriz sugere um aumento na ductilidade e consequentemente da tenacidade, isso não ocorre devido à fragilização da martensita revenida.

Assim o ensaio supriu as expectativas esperadas, rastreando o aumento da ductilidade da matriz nas temperaturas de revenido utilizadas e atestando a qualidade dos tratamentos térmicos.

4.3 Energia absorvida durante o processo de fratura

- **Energia absorvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhe arredondado e agudo**

O Ensaio Charpy Clássico fornece a energia global que o corpo-de-prova absorve durante o ensaio, grandeza esta normalmente obtida pela leitura direta no *Dial* da máquina, a qual é proporcional a variação da energia potencial do martelo pendular.

A energia global calculada no processo de fratura foi determinada sob diferentes taxas de carregamentos, essas variações de carregamento foram propiciadas a partir dos ensaios monotônicos (baixa taxa de deformação) e pelos ensaios dinâmicos, Charpy clássico e instrumentado (altas taxa de deformação). A energia global também foi determinada sob diferentes condições de tratamentos térmicos, como foi descrito na seção 4.2.2. e pela influência de duas condições de entalhes (arredondados e agudo), como podemos observar nas Tabelas 7 e 8, e também podemos ver na Tabela 9, 10, as diferenças percentuais entre as energias globais lida no *Dial* e as calculadas pela integração das curvas dinâmicas.

As variações impostas para a realização dos ensaios, como as diferentes taxas de deformação, condições de microestruturas, obtidas a partir dos tratamentos térmicos, e os diferentes tipos de entalhes, foram propostos exclusivamente para modificar com o tempo fratura do corpo-de-prova, e assim consequentemente alterar a energia absorvida no processo de fratura. E com esses resultados ter o conhecimento do comportamento da metodologia (Ferramenta) envolvida, para a coleta do sinal, e estudar a fratura resultante de um carregamento de impacto, tanto para fraturas de caráter frágil como de caráter dúctil.

Mas como já é sabido, a energia global não tem utilidade prática e quantitativa para serem usadas em cálculos nos projetos, sua utilidade é apenas de caráter qualitativo, ou seja, para classificação de materiais. Considerando esse fato e que com o ensaio Charpy Clássico é

possível obter a leitura da energia de forma direta no *Dial*, não se justifica a instrumentação dessa máquina, mas o intuito da instrumentação é propiciar além da energia global, a captação de um sinal que descreva de forma detalhada, informações sobre os esforços e tensões envolvidos no processo de fratura e através desse detalhamento do processo, ter possibilidade de monitorar a deslocamento da trinca dès de seu início e com isso caracterizar o material ensaiado.

O monitoramento dos esforços envolvidos no processo de fratura, assim como os cálculos das propriedades linear-elásticas e elasto-plásticas (Tenacidades) estão relatadas nas seções 5.4, 5.5 e 5.6.

Tabela 7 – Resultados de energias globais extraídos a partir do processo de fratura, entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Energia Total obtida nos ensaios (J)						
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico [E _M]	Energia absorvida Ensaio Charpy Clássico [E _D]	Ensaio Charpy Instrumentado		
				<i>Instron Wolpert</i>		
				<i>“Avaliação ISO”</i> [E _{IW}]	Média Móvel [E _{MM}]	<i>Wavelets</i> [E _W]
Como-temperado		5 (0,4)*	6 (1)*	6,8 (1,4)*	5,2 (1,6)*	5,4 (1,6)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	13,6 (0,6)	13,3 (0,5)	15,1 (0,5)	12,2 (0,6)	12,8 (0,7)
	573 K	10,3 (0,9)	10,6 (0,5)	12,5 (0,03)	10,9 (0,8)	9,5 (0,4)
	673 K	14 (0,2)	16,6 (1,5)	18,8 (1,4)	14,7 (1,4)	15,3 (1,2)
	773 K	23,1 (0,3)	27,6 (2,8)	30,1 (2,9)	24,7 (2,9)	26 (3,1)

*Desvio Padrão

Tabela 8 – Resultados de energias globais extraídos a partir do processo de fratura, entalhe agudo.

Entalhe Pré-Trincado / Energia Total obtida nos ensaios (J)				
Condição de Tratamento Térmico	Ensaio Monotônico [E _M]	Energia absorvida Ensaio Charpy Clássico [E _D]	Ensaio Charpy Instrumentado	
			<i>Instron Wolpert</i> “Avaliação ISO” [E _{IW}]	Média Móvel [E _{MM}]
Como-temperado	2,1 (0,1)	1,3 (0,5)*	1,7 (0,1)*	1,8 (0,1)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	2 (0,1)	2,3 (0,03)	2,6 (0,5)
	573 K	1,1 (0,1)	2,1 (0,2)	1,9 (0,2)
	673 K	3,6 (0,2)	2,8 (0,3)	3,5 (0,3)
	773 K	9 (0,6)	10,3 (0,1)	13,4 (2,5)

*Desvio Padrão

Tabela 9 – Diferença Percentual entre energia lida no *Dial* (E_D) e do sinal dinâmico (E_{IW}, E_{MM} e E_W), entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Diferença Percentual entre energia lida no <i>Dial</i> (E _D) e do sinal dinâmico (E _{IW} , E _{MM} e E _W)				
Condição de Tratamento Térmico	Monotônica	<i>Instron Wolpert</i>	Média Móvel	<i>Wavelets</i>
	$\frac{E_D - E_M}{E_D} * 100$	$\frac{E_D - E_{IW}}{E_D} * 100$	$\frac{E_D - E_{MM}}{E_D} * 100$	$\frac{E_D - E_W}{E_D} * 100$
	[%]	[%]	[%]	[%]
Como-temperado	16	-13	-13	10
Temperatura de Revenido (K)	473 K	-13	8	5
	573 K	-10	3	10
	673 K	-13	10	7
	773 K	-9	10	5

Tabela 10 – Diferença Percentual entre energia lida no *Dial* (E_D) e dinâmica (E_{IW} e E_{MM}), entalhe agudo.

Entalhe Agudo / Diferença Percentual entre energia lida no <i>Dial</i> (E_D) e dinâmica (E_{IW} e E_{MM})				
Condição de Tratamento Térmico		Monotônica	<i>Instron Wolpert</i>	Média Movel
		$\frac{E_D - E_M}{E_D} * 100$	$\frac{E_D - E_{IW}}{E_D} * 100$	$\frac{E_D - E_{MM}}{E_D} * 100$
		[%]	[%]	[%]
Como-temperado		-61	-30	-38
Temperatura de Revenido (K)	473 K	-45	-15	-30
	573 K	38	-16	-5
	673 K	-24	3	-20
	773 K	6	-7	-39

Como podemos ver, para facilitar a discussão dos resultados de energia obtidos pela integração numérica da curva (monotônica E_M e dinâmica E_{IW} , E_{MM} e E_W) e pela leitura no *Dial* (E_D), e saber como os resultados das curvas dinâmicas estão em relação ao obtidos pela lida no *Dial*, se optou por fazer a diferença percentual dos parâmetros em discussão e a partir daí obter algumas conclusões.

Portanto, analisando as Tabelas 9, onde se tem respectivamente as diferenças percentuais entre as energias obtidas pelas leituras no *Dial* com a integrada na curva dinâmica e monotônicas, podemos observar que a diferença percentual entre os valores em questão, no caso dos entalhes arredondados, temos uma dispersão entre -13% à 16%, mostrando que os resultados estão muito próximos entre si e da referencia tomada, sempre levando em consideração as condições dos ensaios, as dificuldades de captação e tratamento do mesmo. Mas analisando as Tabelas 10, onde se tem respectivamente as diferenças percentuais entre as energias obtidas pelas leituras no *Dial* com a integrada na curva dinâmica e monotônicas, podemos observar que a diferença percentual entre os valores em questão, no caso dos entalhes agudos, temos uma dispersão bem mais acentuada em relação a anterior, ficando esta

entre -61% à 38%, mostrando que os resultados para os ensaios com entalhe agudo se mostraram bem mais dispersos entre si, assim nos levando a salientar que quanto menor o tempo de fratura maiores são as dificuldades de tratar o sinal e obter bons resultados. Mas mesmo assim os resultados obtidos com aplicação da média móvel e com as curvas monotônicas ficaram percentualmente bem próximos dos obtidos pela *Instron Wolpert*, mostrando que os resultados, de um modo geral, estão dispersos em relação a referência tomada, mas próximos dos resultados obtidos pela máquina instrumenta.

Quanto a influência do raio de ponta o que podemos perceber, quando olhamos para a Tabela 7 e 8, onde se encontram os resultados de energia com entalhe arredondado e agudo, é a queda abrupta das energias em todas as condições de tratamento térmico, quando se compara as energias obtidas com os corpos-de-prova com entalhe arredondados com os agudos. Isso já era esperado, pois com a inclusão da pré-trinca, há menos material a ser ensaiado e o entalhe agudo também age como um fragilizador.

Um outro aspecto relevante que pode ser visualizado com a obtenção desses cálculos de energia global envolvidas no processo de fratura é a celha que se forma, próximo à temperatura de revenido de 573 K, tanto para os resultados com entalhe arredondado ou agudo, mas vemos que os resultados do entalhe agudo há a existência da celha, mas essa não é tão pronunciada como no entalhe arredondado, como podemos ver na Figura 35 e 36. Essa falta de sensibilidade pode ser atribuída também a deficiência da ferramenta utilizada para tratamento do sinal, que para tratar de sinais onde o tempo de fratura é muito pequeno se mostrou ainda pouco eficiente.

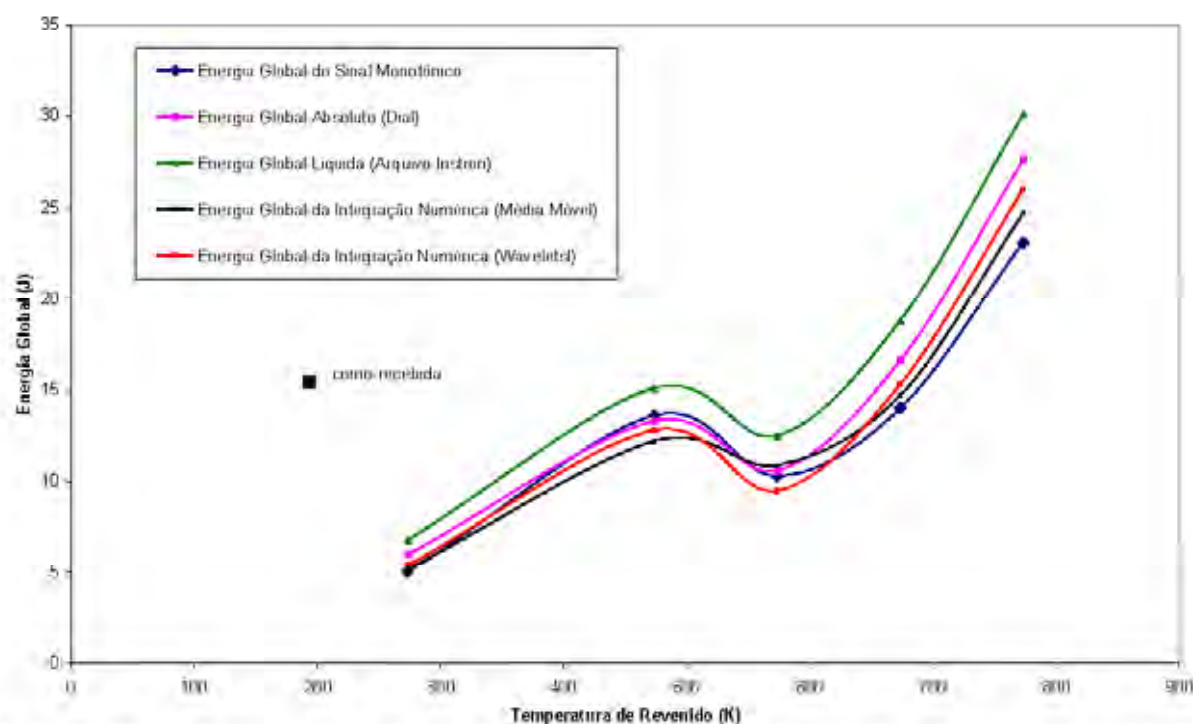


Figura 35 – Energia global envolvida no processo de fratura entalhe arredondado. Visualização da célula de fragilização causada pela martensita revenida a 573 K.

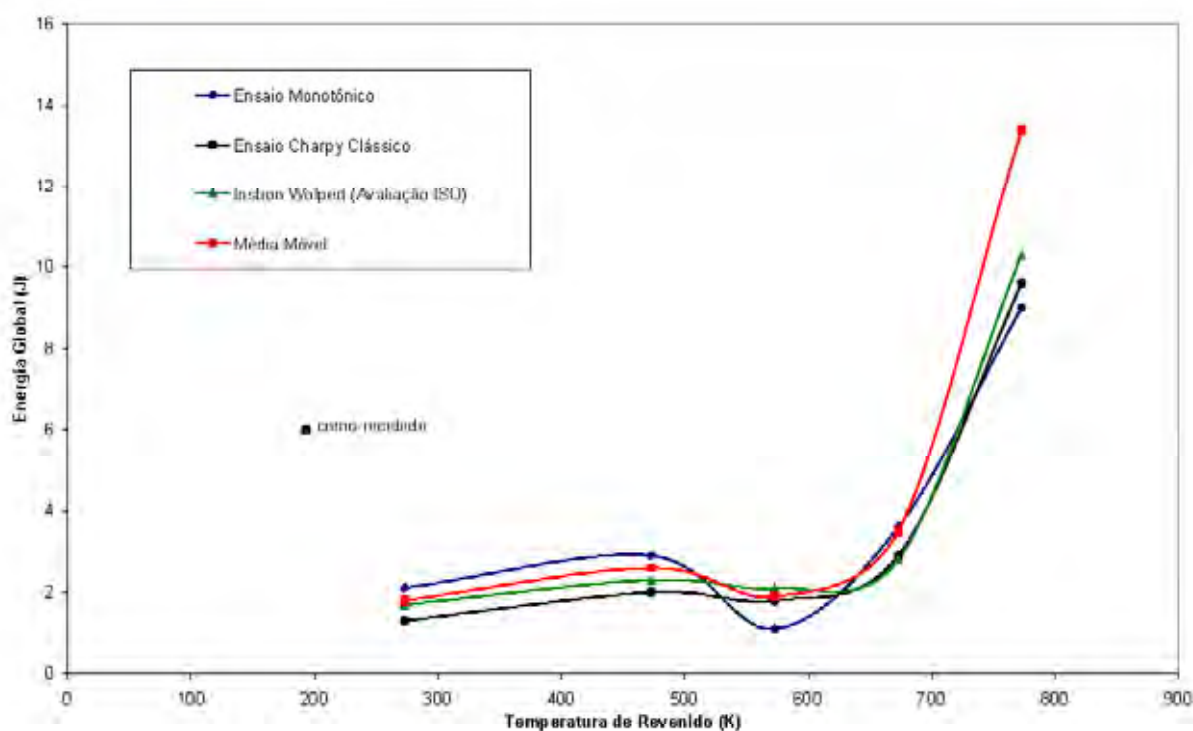


Figura 36 – Energia global envolvida no processo de fratura entalhe agudo. Visualização da célula de fragilização causada pela martensita revenida a 573 K.

4.4 Forças envolvidas no processo de fratura

Como podemos observar na seção 5.3, é possível extrair dos sinais dinâmicos e monotônicos, através da integração numérica sob a curva, a energia consumida no processo de fratura do corpo-de-prova. Mas só isto não justificaria a instrumentação de uma máquina Charpy, pois o ensaio Charpy Clássico já nos oferece este recurso, o grande intuito de desenvolver esta técnica de instrumentação e uma ferramenta capaz de retirar novos resultados desse ensaio, através de uma instrumentação adequada e com elas ter a possibilidade de estudar a fratura resultante de um carregamento de impacto, assim consequentemente descrever os esforços envolvidos e todo o processo de fratura.

Com tudo isso em mãos, pode-se além de obter a energia global, obter as forças envolvidas no processo de fratura e com essas podemos caracterizar o material ensaiado, tais esforços vão ser apresentados e discutidos nas seções 5.4.1 (Força de Escoamento Generalizado), 5.4.2 (Força de Iniciação da Trinca) e 5.4.3 (Força Máxima), respectivamente.

Das forças que foram extraídas a de mais fácil obtenção é a força máxima, pois para sua extração é preciso apenas obter a carga máxima encontrada no arquivo força x deslocamento de cada ensaio.

Já a extração da força de escoamento generalizado foi um pouco mais complexa, pois é preciso delimitar a fronteira entre a zona elástica e a plástica e para isso é necessário que o operador da rotina tenha um pouco de conhecimento do material e do sinal produzido por ele, para poder indicar preliminarmente, com a inserção de dois pontos, a região limite da zona elástica. Com isso a rotina consegue traçar uma reta a partir dos dois pontos escolhidos pelo operador, e quando o sinal começar a sair de um regime linear e descolar da reta traçada a rotina identifica esse ponto, através do cálculo variação dos ΔF (variação da força) e de um parâmetro condicional imposto pela rotina. Essa identificação fica muito subjetiva e

dependente da qualidade do sinal, pois se as regiões do sinal não estiverem bem definida fica a cargo do operador interpretar o local dessa região.

A extração mais complexa feita nesse trabalho foi a obtenção da força de iniciação da trinca, pois ela foi feita de duas maneiras, a primeira maneira foi utilizando a metodologia proposta por Yamamoto e Kobayashi, conhecida como taxa de alteração da flexibilidade (CCR – Compliance Changing Rate) já descrita na seção 3.7.2, essa metodologia foi utilizada para obtenção de todas as cargas desse tipo, cuja elas foram utilizadas para o cálculo das tenacidades à fratura, tanto para as curvas monotônicas, como para as curvas dinâmicas. Já a segunda maneira proposta pela E-399/90, de obter a carga P_Q utilizando a idéia de da P_5 (traçando uma reta secante com 5% de inclinação em relação a zona linear do sinal), foi apenas utilizada nos sinais obtidos com os ensaios dos corpos-de-prova pré-trincado, e foram usadas para os calculados das tenacidades à fratura, das curvas monotônicas e curvas dinâmicas.

4.4.1 Força de escoamento generalizado envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhe arredondado a agudo

No decorrer da fase experimental, foram realizados diversos ensaios monotônicos e dinâmicos, com o intuito de estudar a influência do raio de ponta do entalhe da microestrutura e da taxa de carregamento no processo de fratura do aço ABNT-4340 e um dos maiores ponto a serem levados em consideração é justamente os esforço envolvidos nesse processo de fratura e o primeira força a ser discutida foi a Força de Escoamento Generalizado (F_{gy}) e os valores obtido estão mostrados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Resultado da Força de Escoamento Generalizado (F_{gy}), entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Força de Escoamento Generalizado, F_{gy} (kN)					
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico [F_{gyM}]	Ensaio Charpy Instrumentado		
			<i>Instron Wolpert</i>		
			<i>“Avaliação ISO”</i> [F_{gyISO}]	Média Móvel [F_{gyMM}]	<i>Wavelets</i> [F_{gyW}]
Como-temperado		9,1 (1,4)*	7,5 (1,5)*	11,5 (0,6)*	9,6 (1,8)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	22,7 (7,7)	20,5 (0,5)	17,6 (0,1)	19,4 (1)
	573 K	14,1 (1,0)	8 (1)	16,2 (5,2)	14,3 (3,9)
	673 K	25 (0,1)	22,5 (2,5)	19 (0,8)	21,5 (6,1)
	773 K	20,8 (0,8)	16 (1)	16,4 (1,8)	22,5 (2,1)

*Desvio Padrão

Tabela 12 – Resultado da Força de Escoamento Generalizado (F_{gy}), entalhe agudo.

Entalhe Pré-Trincado / Força de Escoamento Generalizado, F_{gy} (kN)				
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico [F_{gyM}]	Ensaio Charpy Instrumentado	
			<i>Instron Wolpert</i>	
			<i>“Avaliação ISO”</i> [F_{gyISO}]	Média Móvel [F_{gyMM}]
Como-temperado		1,3 (0,1)*	1 (0,1)*	1,5 (0,1)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	1,6 (0,1)	2 (0,1)	2,6 (0,7)
	573 K	1,9 (0,2)	1,7 (0,2)	2,2 (0,2)
	673 K	2,3 (1,1)	3 (0,1)	2,9 (0,3)
	773 K	9 (0,1)	6,4 (0,4)	9,3 (0,8)

*Desvio Padrão

Tabela 13 – Diferença Percentual entre Força de Escoamento Generalizado Monotônico (F_{gyM}) e do sinal dinâmico (F_{gyISO} , F_{gyMM} e F_{gyW}), entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Diferença Percentual entre Força de Escoamento Generalizado Monotônico (F _{gYM}) e do sinal dinâmico (F _{gYISO} , F _{gYMM} e F _{gYW})				
Condição de Tratamento Térmico	<i>Instron Wolpert</i>	<i>Média Movel</i>	<i>Wavelets</i>	
	$\frac{F_{gYM} - F_{gYISO}}{F_{gYM}} * 100$	$\frac{F_{gYM} - F_{gYMM}}{F_{gYM}} * 100$	$\frac{F_{gYM} - F_{gYW}}{F_{gYM}} * 100$	
	[%]	[%]	[%]	
Como-temperado	17	-26	-5	
Temperatura de Revenido (K)	473 K	9	22	14
	573 K	43	-14	-1
	673 K	10	24	14
	773 K	23	21	-8

Tabela 14 – Diferença Percentual entre Força de Escoamento Generalizado Monotônico (F_{gyM}) e do sinal dinâmico (F_{gyISO} , e F_{gyMM}), entalhe agudo.

Entalhe Agudo / Diferença Percentual entre Força de Escoamento Generalizado Monotônico (F _{gyM}) e do sinal dinâmico (F _{gyISO} e F _{gyMM})			
Condição de Tratamento Térmico		Instron Wolpert	Média Movel
		$\frac{F_{gyM} - F_{gyISO}}{F_{gyM}} * 100$	$\frac{F_{gyM} - F_{gyMM}}{F_{gyM}} * 100$
		[%]	[%]
Como-temperado		23	-13
Temperatura de Revenido (K)	473 K	-25	-62
	573 K	10	-15
	673 K	-30	-26
	773 K	28	-3

Para facilitar a discussão dos resultados de força de escoamento generalizado, extraídos dos sinais monotônicos e dinâmicos obtidos pelas técnicas relatadas nessa mesma seção 5.4, e para saber como essas forças extraídas das curvas dinâmicas estão em relação ao obtidos nas curvas monotônicas e qual é a influência do raio de ponta nessas forças e do tipo de tratamentos realizados nos sinais, se optou por fazer a diferença percentual dos parâmetros em discussão e a partir daí obter algumas considerações.

Portanto, analisando as Tabelas 11 e 13, onde se tem respectivamente as forças de escoamento generalizado e suas respectivas diferenças percentuais entre as forças obtidas nas curvas monotônicas com as forças coletadas nas curvas dinâmicas, e onde é levado em conta a influência do raio de ponta e dos tratamentos realizados nos sinais, assim podemos concluir que a diferença percentual entre os valores em questão quando são observados os ensaios com entalhe arredondado estão perto uma variação entre -26% até 43%, mostrando assim que os resultados têm uma dispersão, mas a maior delas estão nos resultados tratados pela *Instron Wolpert*.

Quando vamos analisar o os resultados dos sinais tratados pela média móvel e *Wavelets*, percebemos que a dispersão existe mas é bem menor, como podemos observar na Tabela 13, mas ainda quando levamos em consideração apenas a análise da diferença percentual existente com os sinais tratados com as *Wavelets*, percebemos que essa dispersão diminui ainda mais, isso pode ser atribuído as características intrínsecas do tipo de tratamento do sinal (filtragem pela frequência), como pode ser visualizado na Figura 41 na seção 5.4.4, esse sinal é o que mais se aproxima do sinal monotônico, pois depois da filtragem não sobram quase ruídos e ondulações no sinal.

Quando analisamos as Tabelas 12 e 14, onde se tem respectivamente as forças de escoamento generalizado e suas respectivas diferenças percentuais entre as forças obtidas nas curvas monotônicas com as forças coletadas nas curvas dinâmicas, para os corpos-de-prova do entalhe agudo, podemos concluir que a diferença percentual entre os valores em questão quando são observados os ensaios com entalhe arredondado estão perto uma variação entre - 62% até 28%, mostrando assim que os resultados têm uma dispersão e que nesse caso as dispersões encontradas entre os sinais tratados pela *Instron Wolpert* e os tratado pela rotina estão bem próximos, salvo alguns resultados obtidos pela rotina que estão apresentando uma maior dispersão, como o da condição de revenido a 473 K, onde o tratamento feito pela

Instron Wolpert apresentou uma diferença percentual de -25% em relação aos resultados da referência e os tratados pela rotina apresentaram -62%, respectivamente.

As Figuras 37 e 38, pode demonstrar que o problema não esta só no tratamento do sinal dinâmico, mas sim no sinal monotônico, nestas Figuras, podemos ver que a região inicial do sinal que deveria ser linear, não se comporta com tal e com isso prejudicando a obtenção da carga.

Enquanto a taxa de deformação se formos comparar as forças de escoamento generalizado em uma mesma condição, percebemos que a diferença é bem pequena, salvo em alguns condições de revenido, como as de revenido a 473 K e 773 K, onde observamos na Tabela 14, uma diferença percentual mais acentuada, mostrando que de um modo geral para esses casos estudado a taxa de deformação não tem tanta influência. Já a microestrutura influência muito, pois percebemos as forças em questão se modificam de uma condição de tratamento para outra, mostrando que a microestrutura tem grande influência no comportamento do material como podemos observar os resultados extraídos nas Tabelas 11 e 12.

Os sinais monotônicos foram utilizados nesse trabalho em partes como uma referência em primeira instância, pois são sinais que a priori são isentos de ruídos e ondulações, coisa que não ocorre com os sinais dinâmicos, e por isso são mais fáceis de compreensão, mas os sinais monotônicos utilizados nesse trabalho tiveram alguns problemas no momento de sua captação, como se pode visualizar em alguns exemplos mostrados nas Figuras 37 e 38, pode-se observar que os sinais têm algumas presenças de ruídos, tais ruídos foram inseridos pela própria máquina de ensaio (MTS-810s) e isso veio a prejudicar a extração das forças e com isso prejudicando os dados de referência. Mas mesmo assim o sinal monotônico foi utilizado como parâmetro de comparação e compreensão dos sinais dinâmicos.

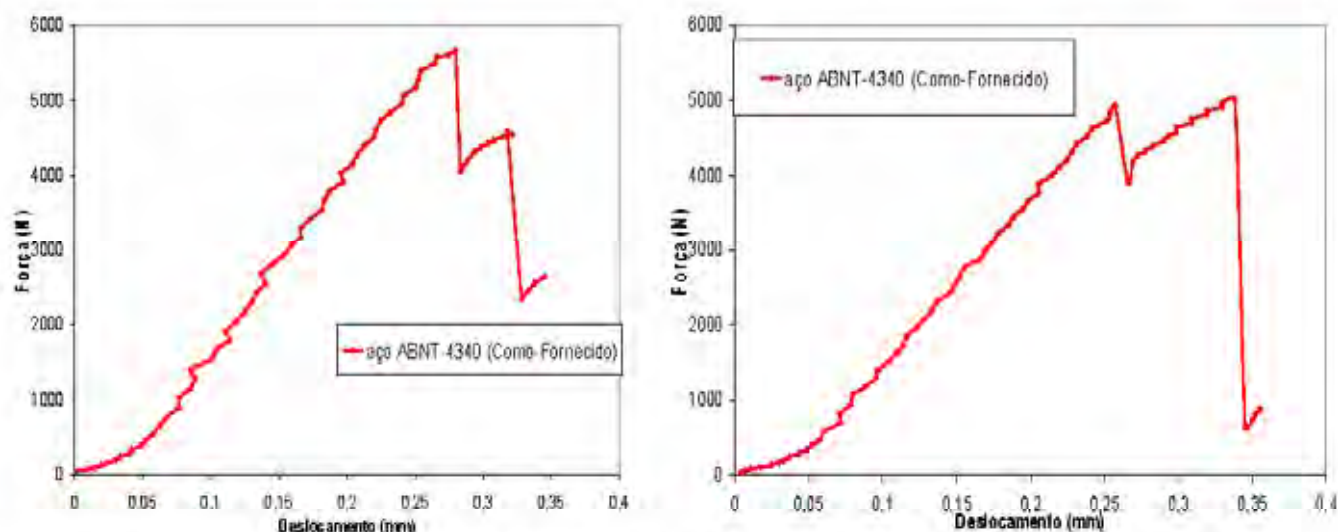


Figura 37 – Sinais do aço ABNT-4340 (Como-recebido), ensaiado monotonicamente com a inserção de ruídos provenientes da máquina de ensaio.

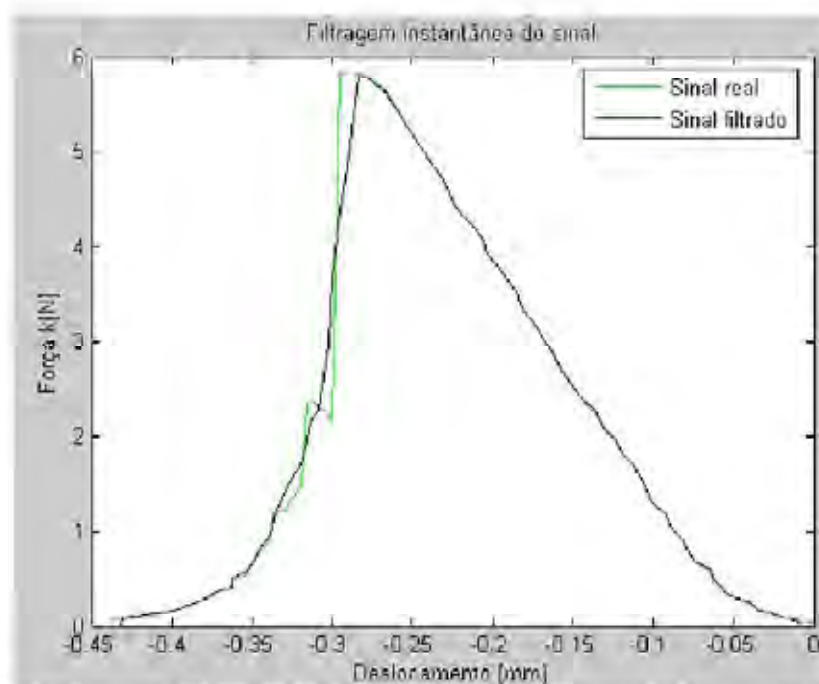


Figura 38 – Sinais do aço ABNT-4340 (revenido a 473 K), ensaiado monotonicamente com a inserção de ruídos provenientes da máquina de ensaio, problema na identificação da região linear elástica.

4.4.2 Força de iniciação da trinca envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhes arredondado e agudo

Como já foi dito na seção 5.4.1, no decorrer do ano de 2005 foi realizados diversos ensaios monotônicos e dinâmicos, com o intuito de estudar a influência do raio de ponta do entalhe da microestrutura e da taxa de carregamento no processo de fratura do aço ABNT-4340, e um dos maiores ponto a serem levados em consideração é justamente os esforço envolvidos nesse processo de fratura, e a força que foi discutida nessa seção foi a Força de Iniciação da Trinca (F_{iu}) e os valores obtido estão mostrados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Resultado Força de Iniciação da Trinca (F_{iu}), Entalhe Arredondado.

Entalhe Arredondado / Força de Iniciação da Trinca, F_m (kN)				
Condição de Tratamento Térmico	Ensaio Monotônico [F_{iuM}]	Ensaio Charpy Instrumentado		
		<i>Instron Wolpert</i>		
		<i>“Avaliação ISO”</i> [F_{iuISO}]	Média Móvel [F_{iuMM}]	<i>Wavelets</i> [F_{iuW}]
Como-temperado	9,9 (1,3)*	----	13,7 (1,1)*	11,7 (2,6)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	----	26,3 (0,7)	26,3(4)
	573 K	----	20,2 (0,3)	20,1 (4,8)
	673 K	----	26,9 (0,8)	30,6 (3,2)
	773 K	----	28,6 (0,3)	23,8 (1,3)

*Desvio Padrão

Tabela 16 – Resultado Força de Iniciação da Trinca (F_{iu}), Entalhe Agudo.

Entalhe Pré-Trincado / Força de Iniciação da Trinca F_{iu} (kN)					
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico		Ensaio Charpy Instrumentado	
		F_{iuM}	P_5	<i>Instron Wolpert</i> “Avaliação ISO” [F_{iuISO}]	Média Móvel [F_{iuMM}]
Como-temperado		2,2 (0,3) ^a	3,9 (0,7) ^a	-----	1,6 (0,7) ^a
Temperatura de Revenido (K)	473 K	3 (0,5)	4,9 (0,5)	-----	3,6 (1,2)
	573 K	3,7 (0,1)	5,4 (0,5)	-----	2,8 (0,3)
	673 K	7,1 (0,6)	8,6 (0,3)	-----	4,5 (0,1)
	773 K	10 (0,2)	10,1 (0,5)	-----	9,1 (0,7)

*Desvio Padrão

Tabela 17 – Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (E-399) P_5 e do sinal dinâmico (F_{iuISO} , F_{iuMM} e F_{iuW}), entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (F_{iuM}) e do sinal dinâmico (F_{iuISO} , F_{iuMM} e F_{iuW})			
Condição de Tratamento Térmico	<i>Instron Wolpert</i>	Média Móvel	<i>Wavelets</i>
	$\frac{F_{iuM} - F_{iuISO}}{F_{iuM}} * 100$ [%]	$\frac{F_{iuM} - F_{iuMM}}{F_{iuM}} * 100$ [%]	$\frac{F_{iuM} - F_{iuW}}{F_{iuM}} * 100$ [%]
Como temperado	-----	-38	-18
Temperatura de Revenido (K)	473 K	-----	-6
	573 K	-----	-21
	673 K	-----	-20
	773 K	-----	4

Tabela 18 - Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (F_{iM}) e da Força de Iniciação da Trinca Monotônico (E-399) P_5 .

Entalhe agudo / Diferença percentual		
Condição de Tratamento Térmico		<i>Monotônico</i> $\frac{P_5 - F_{iM}}{P_5} * 100$ [%]
Como-temperado		43
Temperatura de Revenido (K)	473 K	38
	573 K	31
	673 K	15
	773 K	0,9

Tabela 19 – Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (F_{iM}) e do sinal dinâmico (F_{iISO} , e F_{iMM}), entalhe agudo.

Entalhe Agudo / Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (F_{iM}) e do sinal dinâmico (F_{iISO} e F_{iMM})		
Condição de Tratamento Térmico		<i>Instron Wolpert</i> $\frac{P_5 - F_{iISO}}{P_5} * 100$ [%]
Como-temperado		-----
Temperatura de Revenido (K)	473 K	-----
	573 K	-----
	673 K	-----
	773 K	-----
		<i>Média Movel</i> $\frac{P_5 - F_{iMM}}{P_5} * 100$ [%]
Como-temperado		58
Temperatura de Revenido (K)	473 K	26
	573 K	48
	673 K	46
	773 K	9

Para facilitar a discussão dos resultados de força de iniciação da trinca, extraídos dos sinais monotônicos e dinâmicos obtidos pelas técnicas relatadas nessa mesma seção 5.4, e para saber como essas forças extraídas das curvas dinâmicas estão em relação ao obtidos nas curvas monotônicas e qual é a influência do raio de ponta nessas forças e do tipo de

tratamentos realizados nos sinais, se optou por fazer a diferença percentual dos parâmetros em discussão e a partir daí obter algumas considerações.

Portanto, analisando as Tabelas 15 e 17, onde se tem respectivamente as forças de iniciação da trinca e suas respectivas diferenças percentuais entre as forças obtidas nas curvas monotônicas com as forças coletadas nas curvas dinâmicas, e onde é levado em conta a influência do raio de ponta e dos tratamentos realizados nos sinais, assim podemos concluir que a diferença percentual entre os valores em questão quando são observados os ensaios com entalhe arredondado estão perto uma variação entre -38% até 4%, mostrando assim que os resultados tem uma dispersão, mas que a disparidade entre os resultados obtidos com a média móvel e os obtido com a *Wavelets* dos obtidos com as curvas monotônicas estão próximas. Um aspecto importante a ser discutido é se prestar atenção aos dados tratados com a média móvel e as *Wavelets*, mostrados na Tabela 15 e 17, vamos perceber que eles estão sempre acima dos obtidos monotonicamente, a causa desse fenômeno não é bem clara ainda mas aconteceu sistematicamente, salvo o caso com o revenido a 773 K.

Quando analisamos as Tabelas 16 e 19, onde se tem respectivamente as forças de iniciação da trinca e suas respectivas diferenças percentuais entre as forças obtidas nas curvas monotônicas com as forças coletadas nas curvas dinâmicas, para os corpos-de-prova do entalhe agudo, podemos concluir que a diferença percentual entre os valores em questão quando são observados os ensaios com entalhe arredondado estão perto uma variação entre 9% até 58%, mostrando assim que os resultados têm uma grande disparidade em relação a referencia tomada. As diferenças percentuais calculadas dizem respeito a disparidade que existe entre os ensaios monotônicos e os ensaios dinâmicos tratados pela média móvel e através deles podemos perceber que quanto menos dúctil o resultado obtido vai acumulando uma maior disparidade em relação aos resultados monotônicos, o único resultado obtido que foge dessas linha é o revenido a 473 K.

Os sinais monotônicos como já foi dito foram utilizados nesse trabalho em partes como uma referência em primeira instância, pois são sinais que a priori são isentos de ruídos e ondulações, coisa que não ocorre com os sinais dinâmicos, e por isso são mais fáceis de compreensão, mas os sinais monotônicos utilizados nesse trabalho tiveram alguns problemas no momento de sua coleta, como se pode visualizar em alguns exemplos mostrados nas Figuras 37 e 38 da seção 5.4.1, onde se pode observar que os sinais têm algumas presenças de ruídos, tais ruídos foram inseridos pela própria máquina de ensaio (MTS-810s) e isso veio a prejudicar a extração das forças e com isso prejudicando os dados de referência.

Para obter a força de iniciação da trinca se usou o método da flexibilidade, como já foi dito na seção 5.4, mas no caso dos sinais monotônicos essa determinação da compliance ficou mais difícil e problemático, por causa das características intrínsecas do sinal, e para detectar a região de alteração de flexibilidade nesses casos ficou mais complicado, como podemos visualizar na Figura 39 e 40, onde é mostrada a interface e ferramenta de escolha da região que ocorre a alteração da taxa de flexibilidade e por isso usou-se também o critério da P_5 , para obter a força e ter a possibilidade de comparar essas cargas. Mas mesmo assim sinal monotônico serviu como parâmetro de comparação e compreensão dos sinais dinâmicos.

Mas quando vemos as diferenças percentuais das forças de iniciação da trinca obtida na curva monotônica, obtidas com a compliance e as obtidas com a carga P_5 , podemos perceber que a diferença percentual, variando entre 0,9% à 43%, como se pode ver na Tabela 18, essas forças tem grande influência no cálculo da tenacidade à fratura (K), pois é ela que será usada para realização dos cálculos. Quando comparamos os métodos de obtenção utilizados para neste trabalho, podemos levar em consideração algumas coisas, o método de obtenção da P_5 , relatado na seção 3.7.1, é muito simples e de fácil execução, mas é um método que se mostra a principio com pouco embasamento científico, tem o intuito de indicar a carga onde se inicia o caminhamento da trinca quando não se tem outra possibilidade para

detectar esta carga, já o método da compliance, relatado também na seção 3.7.1, é um método mais elaborado, tenta detectar a mesma carga através da análise da variação de alteração da flexibilidade (identificar o momento do início da propagação da trinca), portanto tem um maior embasamento científico empregado, mas tem alguns inconvenientes como toda técnica, enquanto a técnica de obtenção da P_5 é simples e tem pouco embasamento científico, a técnica da compliance é muito dependente da qualidade do sinal e do comportamento do material a ser ensaiado, ou seja, quanto melhor o sinal e mais comportado for a resposta do material, melhor será a detecção da alteração da flexibilidade, já a qualidade da P_5 independe da qualidade do sinal. Nesse caso em particular estudado no trabalho podemos dizer que existe uma diferença entre a P_5 e a F_{iu} e ela se comporta de forma decrescente, quando tomamos a P_5 como referência, e calculamos a diferença percentual entre a P_5 e a F_{iu} , como feito na Tabela 18, podemos perceber que as cargas F_{iu} (método CCR) tem melhores resultados nas condições de tratamento térmicos que proporcionam maior ductilidade, como na condição de revenido a 773 K, onde a diferença percentual entre F_{iu} e P_5 é de apenas 0,9

Quanto a influência do raio de ponta o que podemos perceber, quando olhamos para a Tabela 15 e 16, onde se encontram os resultados das forças com entalhe arredondado e agudo, há uma queda abrupta dessa força em todas as condições de tratamento térmico, quando comparado com as forças obtidas com os corpos-de-prova com entalhe arredondados. Isso já era esperado, pois com a inclusão da pré-trinca, há menos material a ser ensaiado, ou seja, menos área resistente e o entalhe agudo também age como um fragilizador.

Enquanto a taxa de deformação se compararmos, as forças de iniciação da trinca em uma mesma condição, percebemos que a diferença é bem pequena, mostrando que para esses casos estudado a taxa de deformação não tem tanta influência. Já a microestrutura influencia muito, pois percebemos as forças em questão se modificam de uma condição de tratamento para outra, menores para temperaturas de revenidos mais baixas e maiores para temperaturas

mais altas, mostrando que a microestrutura tem grande influência no comportamento do material.

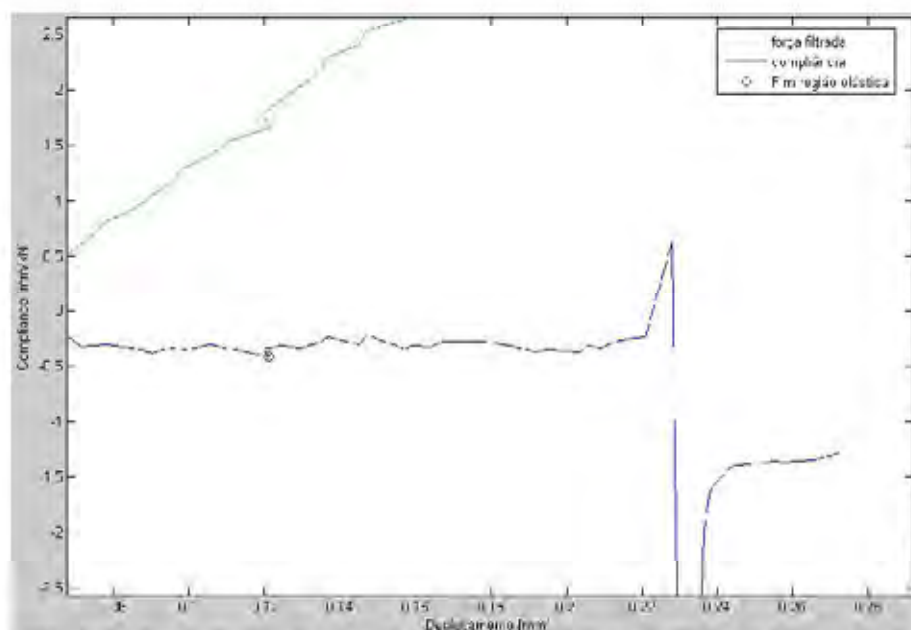


Figura 39 - Interface e ferramenta de escolha da região que ocorre a alteração da taxa de flexibilidade. Região da compliance do corpo-de-prova ensaiado monotonicamente, na condição de revenido à 473 K.

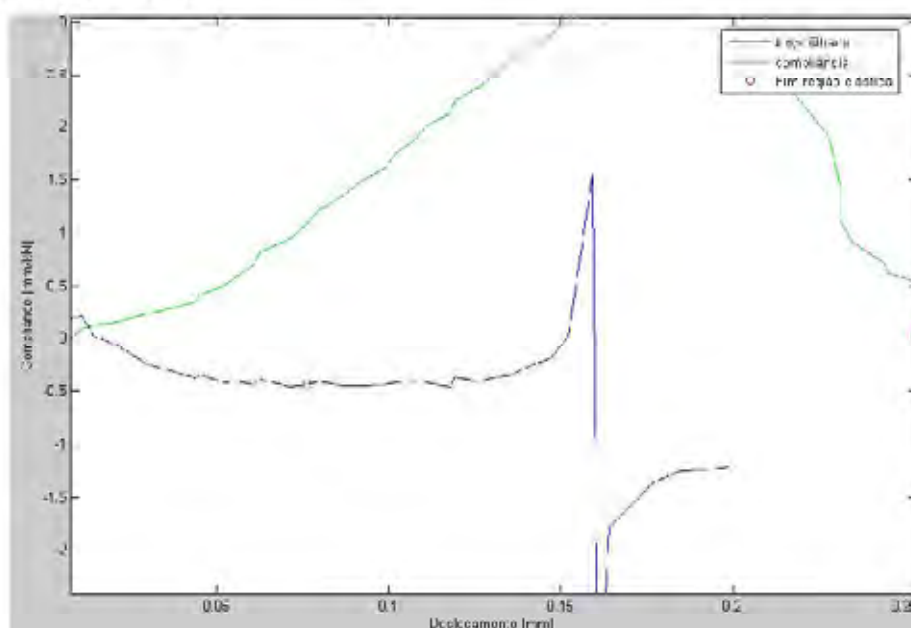


Figura 40 - Interface e ferramenta de escolha da região que ocorre a alteração da taxa de flexibilidade. Região da compliance do corpo-de-prova ensaiado monotonicamente, na condição de revenido à 573 K.

Podemos ver na Figura 39 e 40, a dificuldade de identificar a região exata da compliance, isso ocorre porque o sinal já vem de sua origem com ruído e esse problema é transferido para o cálculo da compliance, como podemos ver no traço azul, nele existem as mesmas ondulações que existem no sinal original (traço verde), esse ruído identificado também no traçado da compliance prejudica e muito a obtenção da região de alteração de flexibilidade. Para suprir essa deficiência no sinal monotônico, foi feito um estudo para conhecimento das características de cada sinal e o conhecimento prévio e aproximado das regiões de interesse e só aí era escolhida a região elástica e depois a definição da compliance, para obtenção da força de iniciação da trinca.

4.4.3 Força máxima envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhes arredondado e agudo

Como já foi dito na seção 5.4.1 e 5.4.2 anteriormente foram realizados diversos ensaios monotônicos e dinâmicos, com o intuito de estudar a influência do raio de ponta do entalhe na microestrutura e da taxa de carregamento no processo de fratura do aço ABNT-4340, e um dos maiores pontos a serem levados em consideração é justamente os esforços envolvidos nesse processo de fratura, e a força que foi discutida nessa seção foi a Força Máxima (F_m) e os valores obtidos estão mostrados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 – Resultado Força Máxima (F_M), entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Força Máxima (kN)				
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico [F_{MM}]	Ensaio Charpy Instrumentado	
			<i>Instron Wolpert</i>	
			“Avaliação ISO” [F_{MISO}]	Média Móvel [F_{MMM}] <i>Wavelets</i> [F_{MW}]
Como-temperado		14(0,9)*	18 (4)*	18,8 (1,5)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	31,5 (0,8)	32 (1)	30,8 (1,3)
	573 K	28,5 (0,9)	25,5 (0,5)	23,3 (3,8)
	673 K	27,6 (0,3)	31,5 (0,5)	29,8 (0,3)
	773 K	26,3 (0,2)	30,5 (0,5)	28,7 (0,3)

*Desvio Padrão

Tabela 21 – Resultado Força Máxima (F_M), entalhe agudo.

Entalhe Pré-Trincado / Força Máxima F_m (kN)			
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico [F_{MM}]	Ensaio Charpy Instrumentado
			<i>Instron Wolpert</i>
			“Avaliação ISO” [F_{MISO}] Média Móvel [F_{MMM}]
Como-temperado		4,2 (0,2)*	10 (1)* 7,3 (0,4)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	5 (0,4)	9 (1) 6,5 (0,9)
	573 K	5,2 (0,2)	7 (0,05) 5,5 (0,2)
	673 K	8,8 (0,05)	9,3 (0,8) 6,7 (0,1)
	773 K	10,7 (0,6)	12,7 (0,5) 11,4 (0,8)

*Desvio Padrão

Tabela 22 – Diferença Percentual entre Força Máxima Monotônico (F_{mM}) e do sinal dinâmico (F_{mISO} , F_{mMM} e F_{mW}), entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Diferença Percentual entre Força Máxima Monotônico (F_{iuM}) e do sinal dinâmico (F_{mISO} , F_{mMM} e F_{mW})				
Condição de Tratamento Térmico		<i>Instron Wolpert</i>	<i>Média Movel</i>	<i>Wavelets</i>
		$\frac{F_{mM} - F_{mISO}}{F_{mM}} * 100$	$\frac{F_{mM} - F_{mMM}}{F_{mM}} * 100$	$\frac{F_{mM} - F_{mW}}{F_{mM}} * 100$
		[%]	[%]	[%]
Como-temperado		-28	-34	-40
Temperatura de Revenido (K)	473 K	-1	2	7
	573 K	10	4	8
	673 K	-14	-7	-13
	773 K	-15	-9	-16

Tabela 23 – Diferença Percentual entre Força Máxima Monotônico (F_{mM}) e do sinal dinâmico (F_{mISO} , e F_{mMM}), entalhe agudo.

Entalhe Agudo / Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca Monotônico (F_{mM}) e do sinal dinâmico (F_{mISO} e F_{mMM})			
Condição de Tratamento Térmico		<i>Instron Wolpert</i>	<i>Média Movel</i>
		$\frac{F_{mM} - F_{mISO}}{F_{mM}} * 100$	$\frac{F_{mM} - F_{mMM}}{F_{mM}} * 100$
		[%]	[%]
Como temperado		-138	-73
Temperatura de Revenido (K)	473 K	-80	-30
	573 K	-34	-5
	673 K	-5	23
	773 K	-18	-6

Para facilitar a discussão dos resultados de força máxima, extraídos dos sinais monotônicos e dinâmicos obtidos pelas técnicas relatadas nessa mesma seção 5.4, e para saber como essas forças extraídas das curvas dinâmicas estão em relação aos resultados obtidos nas curvas monotônicas e qual é a influência do raio de ponta, da taxa de deformação e da microestrutura e dos métodos de tratamento dos sinais para coleta dessas forças, se optou por fazer a diferença percentual dos parâmetros em discussão e a partir daí obter algumas considerações relevantes.

A primeira consideração a ser feita a respeito da extração da força máxima dos sinais é que ela é relativamente simples, ou seja, depois que o sinal foi tratado definitivamente o único trabalho foi procurar a maior carga no arquivo de cada ensaio, extrair e armazenar esses dados.

Analizando a Tabela 20 onde se encontra todos os resultados das forças máximas dos corpos-de-prova com entalhe arredondados, dos diferentes tratamentos de sinais e dos tipos de ensaios empregados (monotônicos e dinâmicos), podemos observar que os resultados estão relativamente próximos, quando comparamos os resultados entre os tipos de ensaios na mesma condição de tratamento térmico. Essas afirmações realizadas ganham maior notoriedade quando é calculada a diferença percentual entre os resultados monotônicos e dinâmicos, que estão dispostos na Tabela 22, onde mostra que existe uma variação que gira em torno de -40% a 10% do valor de referência (monotônico), onde podemos avaliar que esse valor é relativamente pequeno, pois temos que levar em consideração que os resultados relacionados são vindos de tipos distintos de ensaios, onde um é monotônico e o outro é dinâmico e a única coisa em comum entre estes resultados é o tratamento térmico. Um outro aspecto a ser discutido, observando a Tabela 22 é que quando há uma diminuição na ductilidade e por tanto no tempo de fratura dos ensaios, os resultados tendem a ter uma maior disparidade, como podemos observar na condição de tratamento como-temperado. Nota-se que estas condições são mais frágeis (tempo de fratura baixo) e tem as maiores diferenças percentuais, variando entre 38% a 40% do valor.

Quando analisamos os resultados dos ensaios com entalhe agudo na Tabela 21 é observada as mesmas particularidades encontradas e analisadas nos entalhes arredondados, mas agora as cargas encontradas são mais baixas, o tempo de fratura é menor e com isso as diferenças percentuais aumentam, pois como foi observado a ferramenta utilizada para obter os esforços envolvidos com o processo de fratura desenvolvida neste trabalho tem alguns

problemas quando o tempo de fratura fica muito pequeno e assim podemos observar na Tabela 23 que quanto mais frágil é a condição de tratamento térmico, menor o tempo de fratura e maior é a disparidade entre os resultados obtidos, um exemplo é a diferença percentual que existe na condição como-temperado, chega a ter 138% (*Instron Wolpert*) e de 73% (Média Movel) de diferença quando comparado com o valor obtido no ensaio monotônico.

Quanto a influência do raio de ponta o que podemos perceber, quando analisamos as Tabelas 20 e 21, onde se encontram os resultados das forças máxima, com entalhe arredondado e agudo, há uma queda abrupta dessas força em todas as condições de tratamento térmico, quando se compara as forças obtidas com os corpos-de-prova com entalhe arredondados com os agudos. Isso já era esperado, pois com a inclusão da pré-trinca, há menos material a ser ensaiado e o entalhe agudo também age como um fragilizador.

Enquanto a taxa de deformação, se formos comparar as forças máximas em uma mesma condição, percebemos que a diferença são pequena, mostrando que para esses casos estudados a taxa de deformação as vezes pode ter uma pequena influência, pois um outro aspecto que foi notado com as diferenças percentuais, foi que as forças encontradas para os ensaios dinâmicos na maioria das vezes ficaram maiores que as forças monotônicas . A microestrutura influência muito, pois percebemos as forças em questão se modificam de uma condição de tratamento para outra, mostrando que a microestrutura tem grande influência no comportamento do material.

4.4.4 Influência das metodologias de filtragem empregadas, Avaliação ISO (*Instron Wolpert*), Média Móvel e filtragem do sinal pela frequência utilizando as técnicas das Wavelets

Como já foi mostrado nas seções anteriores, é possível obter informações tanto da energia total absorvida no processo de fratura dos corpos-de-prova ensaiados, como também obter os esforços envolvidos nesse processo de fratura, mas isso só é possível quando é possível interpretar o sinal e com isso retirar informações válidas desses esforços. Quando estamos lidando com sinais monotônicos essa interpretação é mais fácil e quase direta, pois o sinal não vem rebuscado e é de fácil compreensão e as normas de se obter as cargas são mais simples de serem empregadas.

Mas quando lidamos com sinais dinâmicos as coisas começam a dificultar, pois os sinais já não vêm com tanta nitidez, porque existem vários ruídos e ondas de choque que vem junto com a aquisição desse sinal, como será explicado nessa seção.

Um outro aspecto influenciou na obtenção das forças envolvidas no processo de fratura, agora nos sinais dinâmicos e consequentemente um fator complicador, foi a filtragem dos ruídos e ondulações provenientes da instrumentação e das ondas de choques ocasionando uma ressonância do martelo que excita varias vez os extensômetros da célula de carga, provocando assim essas ondas no sinal. Na Figura 41 e 42, mostra exemplos dessas filtrações, média móvel (vermelho), *wavelets* (Preto) e o sinal bruto (azul) e suas principais características e particularidades.

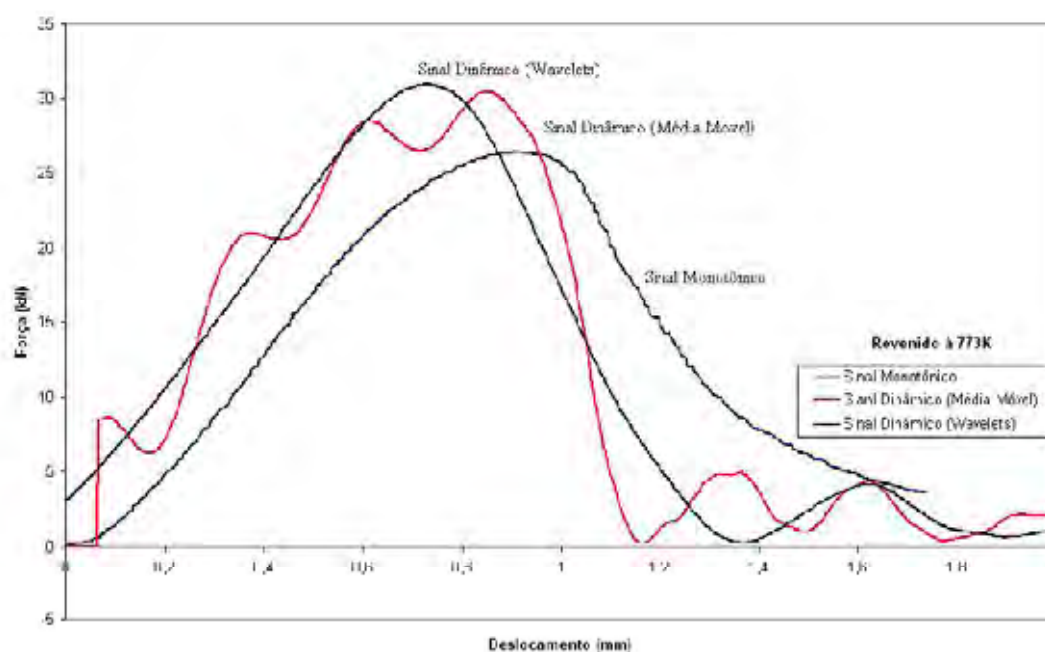


Figura 41 – Sinal de força-deslocamento dos corpos-de-prova entalhados do aço ABNT 4340, evidenciando os sinais sem filtragem (Sinal Bruto), com polimento pela média móvel e filtrado pela frequência (*Wavelets*), Revenido à 773 K.

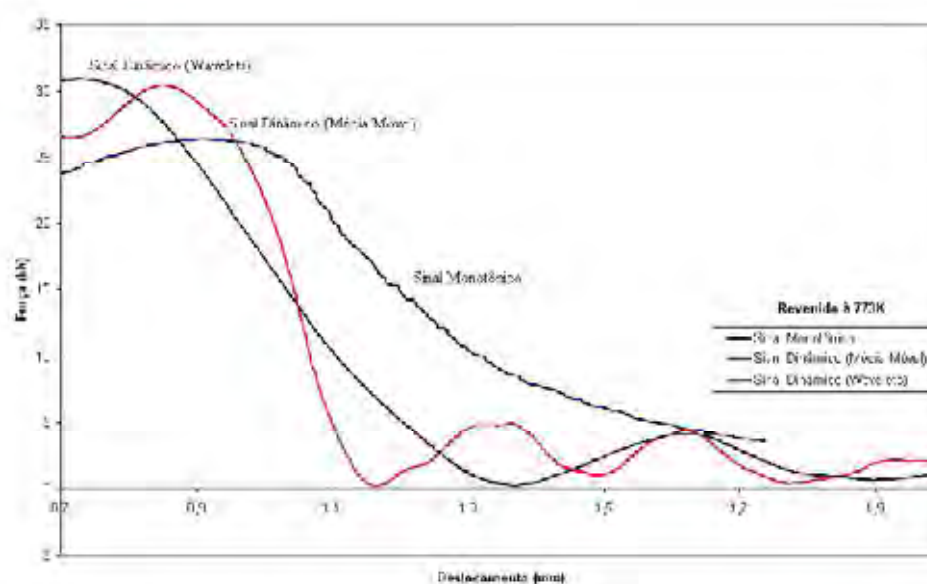


Figura 42 – Análise dos métodos de filtragem do sinal de impacto (atenuação e suavização excessiva do sinal pela filtragem), Análise Gráfica dos três Sinais simultaneamente.

Conforme podemos perceber nas Figuras 41 e 42, ambas as metodologias de filtragens tem seus prós e contras, a filtragem pela frequência (curva em preto), de uma maneira geral

consegue retirar quase todos os ruído e ondulações do sinal, mas também modifica um pouco as características do sinal, já o polimento com a média móvel (Curva vermelha), dependendo do sinal pode prejudicar a extração dos resultados, porque pode atenuar muito e assim mascarar os resultados, para que o sinal não seja prejudicado pela média movel este tem que ter um comportamento simétrico em toda a sua extensão. Assim o que se pode concluir é que a qualidade dos resultados vai depender do conhecimento do operador para com o sinal e do comportamento do sinal, pois é a partir dessa experiência que pode ser decidido qual metodologia vai ser utilizada para filtragem e como ela vai ser utilizada.

Essas afirmações relatadas acima foram embasadas levando em conta o caráter visual, mas quando tratamos os sinais com as técnicas de filtragem e obtemos a energia global e os esforços envolvidos no processo de fratura, esses mostrados nas seções 5.3 e 5.4, percebemos que as diferenças entre essas grandezas calculadas são relativamente pequenas, assim levando a concluir que essas pequenas modificações ocasionadas pela filtragem, não tem grande influência, mas quando a filtragem é bem executada e sempre tendo o bom senso no tratamento dos sinais.

Um aspecto falho na filtragem de sinais utilizando a média móvel é quando o sinal vem de materiais com fraturas de caráter frágil, onde o sinal tem picos de forçar muito irregulares (não simétricos) ou quedas de forçar muito bruscas, sinais com essas características quando filtrado com a técnica da média móvel são muito atenuados e consequentemente todos os dados extraídos desse sinais estarão comprometidos, alguns exemplo desse comportamento podem ser mostrados nas Figura 43 e 44.

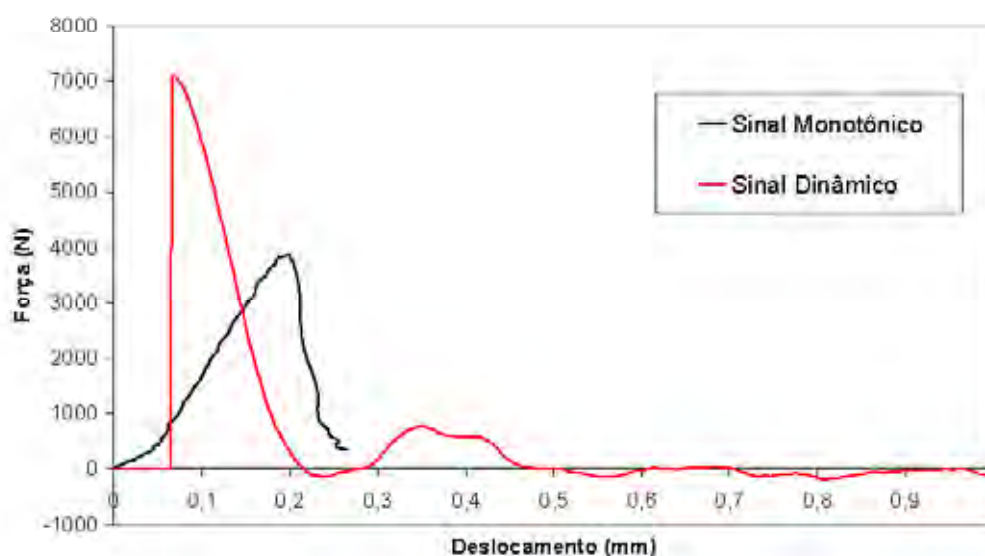


Figura 43 – Sinal dinâmico filtrado pela média móvel (tamanho do filtro - 31), condição de tratamento térmico (como-temperado).

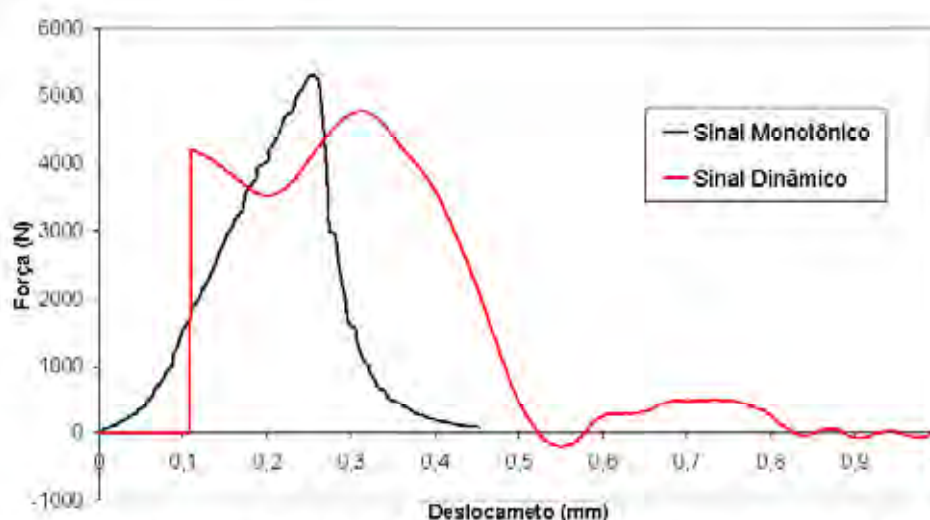


Figura 44 – Sinal dinâmico filtrado pela média móvel (tamanho do filtro - 51), condição de tratamento térmico (Revenido à 473 K).

Conforme podemos ver na Figura 43, quando ocorre um pico muito alto no sinal a média móvel não consegue atenuar de maneira aceitável o sinal, quando comparado com um sinal monotônico e como podemos ver na Figura 44, quando ocorre uma queda brusca no sinal, novamente a média móvel não consegue um bom desempenho, quando comparado com o sinal monotônico e assim fazendo com que o sinal dinâmico seja superestimado ou atenuado.

Quando levamos em consideração a filtragem do sinal utilizando a técnica de filtragem pela frequência (*wavelets*), um aspecto falho é que essa técnica invariavelmente modifica a base do sinal, alongando essa base e assim modificando as características do sinal tratado e com isso pode-se ocasionar algumas modificações dos dados extraídos, como podem visualizar nas Figuras 41 e 42, há um aumento da base do sinal filtrado pelas *wavelets*.

4.5 Cálculo da tenacidade à fratura (K), Mecânica da Fratura Linear-Elástica (entalhe arredondado e agudo)

Nessa seção, pode-se observar nas Tabelas 24 e 25, os valores calculados de tenacidade à fratura aparente (K_{QAE} e K_{IdA}) e de tenacidade à fratura (K_Q e K_{Id}). Na seção será aberta uma discussão de alguns modelos matemáticos empregados para o cálculo da propriedade, bem como as técnicas de determinação das cargas utilizadas para o seu cálculo e também a influência da filtragem do sinal no valor da propriedade determinada.

Tabela 24 – Cálculo da tenacidade Aparente à Fratura, Entalhe Arredondado (Mecânica da Fratura Linear-Elástica).

Entalhe Arredondado / Tenacidade Aparente à Fratura (MPa.m ^{1/2})				
Condição de Tratamento Térmico	Ensaio Monotônico		Ensaio Charpy Instrumentado <i>Instron Wolpert</i>	
	K_{QAE} [E-399/90]	K_{QAA} [Angamuthu]	Média Movel K_{IdA} [E-399/90]	<i>Wavelets</i> K_{IdA} [E-399/90]
Como-temperado	45,1 (3,7)*	44,8 (3,7)*	64,1 (5,7)*	75,9 (2,9)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	127,6 (10)	126,6 (9,9)	123,7 (3,4)
	573 K	106,2 (6,8)	110,3 (9,8)	93,2 (3)
	673 K	110,3 (2,1)	109,5 (2,1)	127,3 (2,7)
	773 K	120,7 (2,2)	119,8 (2,2)	134,5 (1,6)
				141,4 (8,4)

*Desvio Padrão

Tabela 25 – Cálculo da tenacidade à Fratura, Entalhe Agudo (Mecânica da Fratura Linear-Elastica).

Entalhe Pré-Trincado / Tenacidade à Fratura (MPa.m ^{1/2})				
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico		Ensaio Charpy Instrumentado <i>Instron Wolpert</i> [Média Movel]
		K _{ICPS} [E-399/90]	K _{ICFm} [E-399/90]	K _{Id} [E-399/90]
Como-temperado		33,7 (2)*	23,5 (2,5)*	16,5 (2)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	47,6 (2,2)	31,4 (5)	45,5 (1,8)
	573 K	53,5 (3)	38,9 (1)	30,2 (3,1)
	673 K	82,6 (3)	75,7 (6)	47,2 (0,6)
	773 K	100 (3,1)	105,6 (2,2)	101,6 (7,7)

*Desvio Padrão

Tabela 26 – Diferença Percentual entre K_{QA} [ASTM E-399/90] e K_{QAA} [ASTM E-399/90], K_{IdA} [ASTM E-399/90 e Angamuthu], entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Diferença Percentual entre K _{QA} [ASTM E-399/90] e K _{QAA} [ASTM E-399/90], K _{IdA} [ASTM E-399/90 e Angamuthu], entalhe arredondado			
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico [Angamuthu]	Ensaio Charpy Instrumentado <i>Instron Wolpert</i> Média Movel [E-399/90] <i>Wavelets</i> [Angamuthu]
		$\frac{K_{QAE} - K_{QAA}}{K_{QAE}} * 100$	$\frac{K_{QAE} - K_{IdA}}{K_{QAE}} * 100$
		[%]	[%]
Como-temperado		0,6	-42
Temperatura de Revenido (K)	473 K	0,7	3
	573 K	-3	12
	673 K	0,7	-15
	773 K	0,7	-11

Tabela 27 – Diferença Percentual entre K_{QPS} [ASTM E-399/90] e K_{QFIU} [ASTM E-399/90], K_{Id} [ASTM E-399/90 e Angamuthu], entalhe agudo.

Entalhe Arredondado / Diferença Percentual entre K_{QPS} [ASTM E-399/90] e K_{QFIU} [ASTM E-399/90], K_{Id} [ASTM E-399/90 e Angamuthu], entalhe agudo			
Condição de Tratamento Térmico	Ensaio Monotônico [E-399/90]	Ensaio Charpy Instrumentado Instron Wolpert	
		Média Movel [E-399/90]	Média Movel [Angamuthu]
	$\frac{K_{QPS} - K_{QFIU}}{K_{QPS}} * 100$	$\frac{K_{QPS} - K_{Id}}{K_{QPS}} * 100$	$\frac{K_{QPS} - K_{Id}}{K_{QPS}} * 100$
	[%]	[%]	[%]
Como-temperado	29	51	51
Temperatura de Revenido (K)	473 K	4	4
	573 K	43	43
	673 K	42	42
	773 K	-1	-1

Para facilitar a discussão dos resultados mostrados nessa seção, tanto dos sinais monotônicos e dinâmicos, e para saber qual a influência das forças de iniciação da trinca (F_{iu} e P_5) extraídas das curvas monotônicas tem sobre o cálculo da tenacidade a fratura dos corpos-de-prova (K_{QPS} e K_{QFIU}), da taxa de deformação e dos modelos matemáticos empregados neste trabalho, optou-se por fazer a diferença percentual dos parâmetros em discussão e a partir daí obter algumas considerações relevantes.

Conforme podemos observar nas Tabelas 24 e 26, quando levamos em conta os cálculos realizados apenas com os ensaios monotônicos, mas modificando os métodos de cálculo, percebemos que as diferenças são pequenas, sendo a maior diferença encontrada de -3%, esses resultados vem nos mostrar que quase não há diferença entre os métodos utilizados (Angamuthu e ASTM E-399) e esse comportamento pode ser percebido nos resultados obtidos na Tabela 25 com os ensaios dinâmicos dos corpos-de-prova de entalhe agudo, também não existem diferenças nesses resultados.

Analisando a influência dos métodos de filtragem utilizados nos sinais dinâmicos sobre o cálculo da tenacidade, e sabendo que os métodos foram empregados apenas nos entalhados, podemos observar na Tabela 24 que os resultados tratados pela média móvel estão sempre menores em relação aos obtidos com as *wavelets* e a diferença percentual é cerca de 10% em média, isso e as diferenças mostradas na Tabela 26, nos leva a concluir que para esse caso os resultados obtidos com a média móvel estão mais próximos de nossa referência (resultados monotônicos).

Quando analisamos os resultado da Tabela 25 e 27, onde se encontram os cálculos de tenacidade dos ensaios monotônicos utilizando a carga P_5 e a força de iniciação da trinca, a F_{iu} nos podemos perceber que os valores encontrados com o uso da P_5 é sempre maior e a diferença percentual entre as tenacidades calculada com ela em relação a F_{iu} tem uma variação entre -5% a 29%, outro aspecto que também é detectado é que quanto menor o tempo de fratura maior é a diferença percentual encontrada, mostrando que a ferramenta em estudo não se comporta adequadamente com sinais que representam materiais com fraturar extremamente frágeis.

Um outro aspecto que pode ser discutido é quando comparamos os resultados de tenacidade calculadas com as cargas monotônicas com as calculadas com as cargas dinâmicas, podemos encontrar diferenças percentuais na Tabela 27, variando de -1% para os casos mais dúcteis (revenido a 773 K) ate 51% para os casos mais frágeis (como-temperado), e isso mais uma vez vem nos confirmar que a ferramenta não tem uma boa resposta para sinais cujo tempo de fratura é muito pequeno.

4.6 Cálculo da tenacidade à fratura, Mecânica da Fratura Elásto-Plástica (entalhe arredondado e agudo)

Como já sabemos foram feitos diversos ensaios e a partir desses ensaios pode-se determinar a energia e os esforços envolvidos no processo da fratura dos corpos-de-prova ensaiados, essas grandezas foram apresentadas e discutidas nas seções 5.3 e 5.4.

Nessa nova seção 5.6, foram mostrados nas Tabelas 28 e 29, os valores calculados de tenacidade à fratura aparente (J_{QA} e J_{IdA}) e de tenacidade à fratura (J_Q e J_{Id}).

Tabela 28 – Cálculo da tenacidade Aparente à Fratura, Entalhe Arredondado (Mecânica da Fratura Elásto-Plástica).

Entalhe Arredondado / Tenacidade Aparente à Fratura J_{IdA} (kJ/m ²)					
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico [J_{QAM}]	Ensaio Charpy Instrumentado		
			<i>Instron Wolpert</i>	<i>Wavelets</i>	
			“Avaliação ISO” [J_{IdASO}]	Média Móvel [J_{IdAM}]	[J_{IdAW}]
Como-temperado		49,5 (1,6)*	59,8 (10,2)*	51,3 (16,3)*	54,2 (16,4)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	138,4 (5,3)	135,6 (6,6)	127,6 (12,1)	134,1 (14)
	573 K	103,4 (8,6)	107,3 (6,7)	84,3 (7,1)	95,9 (3,5)
	673 K	118,1 (5,1)	171,9 (16,7)	151,2 (15)	157,9 (13,7)
	773 K	234,8 (0,8)	281,2 (29,1)	251,3 (29,9)	264,3 (31,1)

*Desvio Padrão

Tabela 29 – Cálculo da tenacidade à Fratura, Entalhe Agudo (Mecânica da Fratura Elástico-Plástica).

Entalhe Pré-Trincado / Tenacidade à Fratura J_Q e J_{Id} (kJ/m ²)					
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico		Ensaio Charpy Instrumentado	
		$[J_m]$	$[J_{QM}]$	<i>Instron Wolpert</i>	
				<i>“Avaliação ISO”</i> $[J_{IdISO}]$	Média Móvel $[J_{IdAMM}]$
Como-temperado		9,5 (0,5)*	37 (1,7)*	24,4 (4,1)*	36,4 (2,2)*
Temperatura de Revenido (K)	473 K	14 (2,3)	45,9 (2,1)	32,3 (1,8)	40,9 (2,1)
	573 K	17,3 (0,4)	43 (7,8)	27,3 (4,5)	31,4 (0,1)
	673 K	29,5 (2)	53,4 (6,4)	42,6 (14,7)	40,6 (2)
	773 K	37,9 (5,2)	204,3 (5,1)	133,3 (2,3)	104,6 (9,5)

*Desvio Padrão

Tabela 30 – Diferença Percentual entre J_{QA} e J_{IdISO} [Avaliação ISO], J_{IdAMM} [Média Móvel] e J_{IdAW} [Wavelets], entalhe arredondado.

Entalhe Arredondado / Diferença Percentual entre J_{QA} e J_{IdISO} [Avaliação ISO], J_{IdAMM} [Média Móvel] e J_{IdAW} [Wavelets], entalhe arredondado.				
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Charpy Instrumentado		
		<i>“Avaliação ISO”</i> $[J_{IdISO}]$	<i>Instron Wolpert</i> Média Móvel $[J_{IdAMM}]$	<i>Wavelets</i> $[J_{IdAW}]$
		$\frac{J_{QAM} - J_{IdISO}}{J_{QAM}} * 100$	$\frac{J_{QAM} - J_{IdAMM}}{J_{QAM}} * 100$	$\frac{J_{QAM} - J_{IdAW}}{J_{QAM}} * 100$
		[%]	[%]	[%]
Como-temperado		-20	-3	-9
Temperatura de Revenido (K)	473 K	2	7	3
	573 K	-3	18	7
	673 K	-45	-28	-33
	773 K	-19	-7	-12

Tabela 31 – Diferença Percentual entre J_{QA} e J_{IdISO} [Avaliação ISO], J_{IdMM} [Média Móvel], entalhe agudo.

Entalhe Arredondado / Diferença Percentual entre J_{QA} e J_{IdISO} [Avaliação ISO], J_{IdMM} [Média Móvel] e J_{IdAW} [Wavelets], entalhe arredondado.				
Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico	Ensaio Charpy Instrumentado <i>Instron Wolpert</i>	
		$J_m = \frac{2E_T}{B(W - a_m)}$	"Avaliação ISO" [J_{IdISO}]	Média Móvel [J_{IdMM}]
		$\frac{J_{QM} - J_{Qm}}{J_{QM}} * 100$ [%]	$\frac{J_{QM} - J_{IdISO}}{J_{QM}} * 100$ [%]	$\frac{J_{QM} - J_{IdMM}}{J_{QM}} * 100$ [%]
Como-temperado		74	34	1
Temperatura de Revenido (K)	473 K	69	29	10
	573 K	59	36	26
	673 K	44	20	23
	773 K	81	34	48

Os tipos de filtragens utilizados foram o da própria *Instron Wolpert* (Avaliação ISO), a Média Móvel e a filtragem pela frequência (*Wavelets*), os resultados de J podem se vistos e comparados diretamente, utilizando a Tabela 28 e 29 e percentualmente através da diferença percentual, mostrada na Tabela 30 e 31.

Conforme podemos observar nas Tabelas 28 e 30, as quais dizem respeito ao cálculo da componente plástica da tenacidade a fratura aparente, onde o raio de ponta é arredondado, podemos observar a influência que os tipos de tratamento de filtragem empregados no tratamento dos sinais, esses sinais filtrados dão origem as energias e os esforços envolvidos no processo a fratura, e é através de alguns dados desses que são calculados os valores de J . como podemos observar existem diferenças entre os valores calculados, mas a diferença percentual é pequena, quando levamos em conta que os resultados comparados são provenientes de ensaios distintos, com características distintas e que a única coisa que esses resultados tem em comum é o tratamento térmico realizado, e assim podemos ver que a variando existente é de -45% à 18% do valor, e quando comparamos a diferença numérica dos valores entre os obtidos no ensaio monotônico e os dinâmicos, vemos que essa diferença

também não é são significativas no decorrer das condições de tratamento térmico, essa pouca disparidade dos resultados era esperada, porque o J é muito dependente da energia envolvida no processo e da área trabalhada, e como essas duas grandezas nesta ocasião quase não se modificam, os resultados calculados para cada condição de tratamento térmico também não sofrem muita disparidade entre ela.

Quando levamos em consideração as taxas de deformação, os resultados dos ensaios com os corpos-de-prova com entalhes arredondados, ficam muito próximos quase não tendo diferença, tanto numérica quanto percentual, isso porque a taxa de deformação não tem grande influência no cálculo dessa propriedade como a área trabalhada e a energia global, como já foi dito anteriormente, mas quando vamos fazer a mesma análise para os corpos-de-prova com entalhe agudo, a diferença entre os resultados obtidos com as curvas monotônicas e com as curvas dinâmicas ficam muito grande, mas a causa desse fenômeno não foi detectada a priori, mas quando é calculada o trabalho realizado sob monotônica, como é mostrado na Tabela 29, a grandeza J_{QM} que corresponde a esse trabalho, mostra que os valores correspondente das curvas monotônicas começam a ter uma aproximação dos resultados obtido das curvas dinâmicas, mas ainda existe uma diferença razoável em relação algumas condições de tratamento térmico, como por exemplo podemos perceber na condição de revenido a 773 K, chegando a uma diferença percentual do valor de referência de aproximadamente 50%, mas esse fenômeno ainda não se sabe ao certo o porquê ocorre.

5 Conclusões

Apresentou-se neste trabalho um estudo experimental para se obter a aproximação de uma ferramenta capaz de estudar a fratura resultante de um carregamento de impacto, sendo este o objetivo central de estudo.

• Conclusões Gerais

Tendo em vista o objetivo central, de obter uma aproximação de uma ferramenta capaz de estudar a fratura resultante de um carregamento de impacto, pode-se concluir que foi dado um grande passo nessa direção, a rotina foi implementada, os conceitos básicos dessa ferramenta foram bem assimilados, houve um entendimento de todos os degraus que devem ser vencido para se obter esta ferramenta, assim nos levando a um caminho de sair de uma máquina Charpy Clássica e chegando a uma máquina Charpy Instrumentada e através dessa máquina saber obter o sinal, interpretar e tratar este sinal corretamente.

Com tudo o que foi dito em mente, pode-se concluir que obteve-se uma ferramenta, mas esta ainda em fase de aprimoramento, ou seja ainda é um protótipo da ferramenta que se almeja. Ainda apresenta alguns problemas no tratamento de sinais onde o tempo de fratura tem um curtíssimo espaço de duração, os de caráter frágil, mas quando o tempo de fratura começa a aumentar, a ductilidade aumenta, a ferramenta tende a obter resultados mais contundentes e maior representatividade do fenômeno.

• Conclusões Parciais

→ Quanto as energias globais obtidas o que podemos concluir a respeito é que quando o tempo de fratura é razoavelmente grande, os resultados obtidos, tanto nos ensaios monotônicos como nos ensaios dinâmicos são satisfatórios, quando comparados com as energias lidas no *Dial* da máquina Charpy Clássica, o erro percentual geral obtido para esses

casos chega a 9% em média, levando em consideração todos as condições de tratamento térmico. Mas quando analisamos as energias globais obtidas a partir dos ensaios com o entalhe agudo e toma-se como referência as energias lidas no *Dial* da máquina e calculamos as diferenças percentuais entre as lidas no *Dial* e as energias das integrações numéricas, percebe-se que os resultados começam a ter uma maior dispersão, e logo podemos concluir mais uma vez que quando menor o tempo de fratura, maior é diferença percentual entre a energia integrada e a lida no *Dial*, mostrando que a ferramenta utilizada tem alguns problemas quando o fenômeno captado ocorre em pequenos espaços de tempo, esse fenômeno pode ser percebido na Tabela 10, onde por exemplo a diferença percentual existente entre a energia monotônica calculada e a lida no *Dial* na condição de revenido a 773 K é bem inferior a observada na condição de como-temperado, ilustrando bem a dificuldade da ferramenta quando o tempo de fratura diminui.

→ Quanto a força de escoamento generalizado o que pode-se concluir a respeito é que para obtenção dessa carga o conhecimento prévio do comportamento do material tem que existir, tem que haver um conhecimento do sinal gerado, as localizações das regiões elásticas e plásticas, pelo menos ter uma idéia geral sobre esses pontos. Quanto ao julgamento dos valores, o que pode-se concluir é que há uma diferença percentual desses valores, quando comparados com nos referência, mas não pode-se perder de vista é que se trata de dois resultados obtidos de corpos-de-prova totalmente distintos, onde a única coisas que se pode dizer que existe de igual entre eles e que a partir daí pode-se compará-los é o tratamento térmico. Tendo isso em mente, o que pode-se verificar e concluir de um modo geral que há uma diferença percentual razoável entre os resultados levantados, como pode ser visto nas Tabelas 13 e 14, girando entorno de -26% à 24%, para os entalhes arredondados e de -30% à 23%, para os entalhes agudos. Salvo em algumas condições onde as diferenças se excederam muito, como é o caso do revenido a 473 K, entalhe arredondado e tratado pela média móvel,

com uma diferença percentual de -62% da referência, mostrando que houve problemas na detecção dessa carga em particular, e isso foi detectado na Figura 37 e discutido na seção 5.4.1.

→ Quanto a força de iniciação da trinca o que pode-se concluir a respeito é que as ferramentas e técnicas utilizadas nesse trabalho mostram que são promissoras, ainda não se pode afirmar com certeza o potencial das técnicas de obtenção da força de iniciação da trinca, os resultados experimentais não deram toda confiabilidade precisa para isso, mas mostrou que os estudos feitos são um bom caminho a ser trilhado.

A carga P_5 adotada pela ASTM E-399, se mostrada uma alternativa simples de se obter a carga de iniciação da trinca, mas não dá indícios concretos se a carga que está sendo coletada é realmente a carga correta a ser usada, mesmo assim é um método que pode ser utilizado quando preciso, mas sempre respeitando os parâmetros de restrição estipulados pela norma vigente.

O método CCR (Compliance Changing Rate) se mostrou um método muito eficiente, com um bom embasamento teórico para obtenção da taxa de alteração da flexibilidade e assim obter o início da propagação da trinca, mas um ponto fraco de sua utilização é quanto a sua dependência a qualidade do sinal utilizado, se essa não estiver boa os resultados obtidos perdem sua confiabilidade, pois a ferramenta perde sua precisão, isso pode ser notado na seção 5.4.2, onde se mostrou nas Tabelas 15, 16, 17, 18 e 19 os valores das forças determinadas e a diferença percentual entre elas e também pode ser visto nas Figuras 38 e 39 a dificuldade de identificação da ocorrência da alteração na taxa de flexibilidade. Assim o que pode-se concluir sobre essas ferramentas aplicadas no trabalho para detecção da força de iniciação da trinca é que são válidas e promissoras, mas é necessário realizar mais estudos sobre elas.

→ Quanto a Força máxima apresentadas e observada neste presente trabalho, a primeira conclusão feita diz respeito a dificuldade de obtenção dessa carga, entre as cargas apresentadas nesse trabalho, a força máxima foi a de mais fácil obtenção, pois depois do sinal ser tratado a única dificuldade era encontrar e coletar a maior carga existente no arquivo do sinal. Um outro aspecto que foi notado com as diferenças percentuais nas Tabelas 21 e 22, foi que as forças encontradas para os ensaios dinâmicos na maioria das vezes as cargas ficaram maiores do que no ensaio monotônico, salvo alguns resultados, e isso nos leva a concluir que a taxa de deformação tem algumas influência sobre esse fenômeno.

Quando observa-se a Tabela 21 e 22 também percebe-se que a medida que diminui o tempo de fratura as diferenças calculadas vão aumentando, esse fato leva a concluir que a ferramenta usada para o tratamento do sinal, quando trata de sinais vindo de ensaios onde o tempo de fratura é muito pequeno, como por exemplo o como-temperado, os resultados obtidos começam a se deteriorar. Calculando a diferença percentual, isso é notório, pois se vê que a diferença encontrada na temperatura de revenido a 773 k e tratado pela média movel é de -9% para o arredondado e de -6% para o agudo e para o como-recebido essa diferença é muito maior, chegando a -34% para os arredondados e -73% para os agudos, isso comprova que a ferramenta utilizada ainda tem dificuldades para tempos de fratura muito pequeno.

→ Quanto as técnicas de filtragens do sinal pode-se concluir que elas são responsáveis pela qualidade ou distorção dos resultados extraídos, se a filtragem for bem sucedida e não haver atenuação do sinal, os resultados extraídos serão de boa qualidade e confiabilidade, mas se houver distorção do sinal os resultados extraídos serão errôneos e de baixa qualidade.

Quando leva-se em consideração os método de filtragens utilizados nesse trabalho e os resultados obtidos com os sinais filtrados por eles, pode-se concluir que os métodos tem uma boa funcionalidade e que o caminho a ser seguido esta na direção certa, mas não pode-se atestar com veemência que os resultados obtidos nesse trabalho são as provas cabais para se

certificar do uso correto dessas ferramentas experimentadas. Os experimentos realizados serviram apenas como um indicativo do caminho a ser trilhado, mas não se tem uma gama de experimentos suficiente para chegar a um veredicto.

Hoje pode-se concluir que as ferramentas utilizadas tem uma boa resposta para ensaios onde o tempo de fratura é relativamente grande (maior ductilidade) e conforme esse tempo de fratura vai diminuindo (menor ductilidade) os resultados extraídos vão se deteriorando, mostrando que a ferramenta precisa de ser aprimorada nesse sentido.

→ Quanto ao cálculo da tenacidade a fratura K_{Id} , quando se leva em consideração a tenacidade aparenta à fratura, na presença de um entalhe arredondado, pode-se perceber que os resultados estão de um forma geral na mesma grandeza de escala, isso nos leva a concluir que a ferramenta projetada esta nos dando uma resposta no mínimo coerente com esperado. Quando se averigua as diferenças percentuais existente entre os resultados obtidos nos ensaios monotônicos e dinâmicos, apresentados na Tabela 26, percebe-se que em algumas condições de tratamento, as diferenças encontradas estão muito altas, como é o caso da condição como-temperada, aonde as disparidades chegam a mostrar uma diferença de -42% entre os resultados obtidos com a média móvel e -68% obtidos com as wavelets, isso leva a concluir mais uma vez que a ferramenta ainda tem problemas onde a fratura tem um curto tempo de duração.

Um outro aspecto importante que se pode concluir com as diferenças percentuais apresentadas na Tabela 26, é que as diferenças apresentadas nos resultados concebidos com os sinais tratados com as wavelets, se apresentaram sempre maiores do que as diferenças apresentadas nos resultados dos sinais tratados com as médias moveis, isso leva a concluir que os resultados concebidos pela média móvel estão mais próximos de nossa referência. Quando se compara os resultados e analisa os modelos matemáticos empregados nesse trabalho podemos concluir que as diferenças são pequenas e que os modelos matemáticos

utilizados não tem tanta influência nos valores obtidos, pois a única mudança entre um modelo e outro é o fator de forma usado, e este exerce uma influência pequena sobre o valor calculado.

Quando se concluir sobre a tenacidade à fratura a frente de uma trinca aguda, pode-se perceber que a uma queda nos valores calculados e isso leva a concluir que o raio de ponta exerce uma influência sobre essa propriedade. Nesta etapa foram utilizadas para o cálculo de K_{Q_2} duas cargas a P_5 e a F_{10} , e levou-se com referência os valores concebidos pela P_5 , pois esta é utilizada na norma ASTM E-399, com isso em mente foi obtida diferença percentual, onde pode-se perceber que as forças envolvidas tem uma diferença considerável entre elas e que isso influenciou diretamente nos resultados da Tabela 25 e onde pode-se concluir que a carga utilizada tem uma influência muito grande no valor de tenacidade. Um outro aspecto interessante que pode ser concluído mais uma vez é a dificuldade da ferramenta em obter bons resultados em pequenos tempos de fratura, pode-se perceber na Tabela 27, que para condições de tratamentos como as revenidos a 773 K (-5%) essas diferenças são menores e a partir do momento que vai para condições mais frágeis, as diferenças encontradas vão aumentando, como na condição como-temperado(-29%).

→ Quanto ao cálculo da tenacidade a fratura J_{Id} , quando vamos levar em consideração a tenacidade aparenta à fratura, na presença de um entalhe arredondado, pode-se concluir que a ferramenta, apesar de ter uma disparidade entre os valores, mostrou eficaz quando o tempo de fratura é maior, mas quando se observa os valores calculados na presença de um trinca aguda percebe-se alguns problemas nos resultados dos ensaios monotônicos e quando esse valor é calculado fora da ferramenta, os resultados encontrados são outros, como pode-se observar na Tabela 29, esse problema na rotina não foi identificado.

6 Sugestões de Trabalhos Futuros

- ✓ Aprofundar os estudos sobre os tipos de filtragens dos sinais coletados pela frequência;
- ✓ Realizar ensaios de Impacto Charpy Instrumentado, com corpos-de-prova instrumentados (células de carga) e confrontar os sinais obtidos com os sinais captados com o martelo instrumentado;
- ✓ Realizar estudos e análises das superfícies de fratura, através de técnicas de fractografia, para se obter um parâmetro mais amplo de entendimento do caminho da fratura.

7 Referências Bibliográficas

- AGGAG, G. TAKAHASHI, K.** *Study of oscilation signal in instrumented Charpy Impact test.* *Polymer Engineering and Science*, v.36,n17,p.2260-6, 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** *Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.* In: Annual book of ASTM standards: metals test methods and analytical procedures. Danvers: ASTM. p.136-55. (ASTM E23-96), 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** *Standard test methods for plane-strain fracture toughness of metallic materials.* In: Annual book of ASTM standards: metals test methods and analytical procedures. Danvers: ASTM. p.407-37. (ASTM E399-90), 1996.
- ANDERSON, T. L.** *Fracture Mechanics – Fundamentals and Aplications.* 2ed Boca Raton. CRC press, 688 p, 1995.
- ANGAMUTHU, K.; GUHA, B.; Abd ACHAR, D. R. G.** *Investigation of dynamic fracture toughness (JId) behavior of strength mis-matched Q & T steel weldmenst using instrumented Charpy impact testing.* *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 64, p 417-432, 1999.
- BÖHME, W. et al.** *Scatter of a ferritic steel in the transition region analyzed by Charpy test and dynamic tensile test.* *Nuclear Engineering and Desing*, v.188,p.149-54,1999.
- BÖHME, W. KALTHOFF, J. F.** *The Behavior of notched bend specimens in impact testing.* *International Journal of Fracture*, v.20,p.R139-R41, 1982.
- BROEK, D.** *Failure analysis and fracture mechanics.* In: POWELL, G. W., MAHMOUD, S. E. (Coord.) *ASM handbook: Failure analysis and prevetion.* 9.ed. Ohio: ASM, p.47-65, 1995.
- CETILIN P. R; SILVA, P. S. P.** *Análise de Fraturas*, Associação Brasileira de Metal, 2ed. p. 5-63, 1979.
- CHIAVERINI, V.** *Aços e Ferros Fundidos – Características Gerais Tratamento Térmicos Principais Tipos.* 5ed ABM (Associação Brasileira de Metais), 11,1987.
- DELFORGE, D. Y. M.** *Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto Charpy.* Campinas, 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 1994.
- DELFORGE, D. Y. M. TOKIMATSU, R. C; FERREIRA, I.** IN: *Anais do I Seminário de Mecânica da Fratura* . p. 325-344. Ouro Preto-MG, junho/1995.
- DIETER, G. E.** in *Metalurgia Mecânica.* 2ed.Trd Silva, A. S. S; Almeida, L. H. e Miranda, P. E. V; Rio de Janeiro: Guanabara Dois, p.419-50, 1981.

- DIETER, G. E.** *Fratura frágil e ensaio de impacto*. In: Metalurgia mecânica. 4.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, p.471-500, 1988.
- DOEBELIN, E. O.** *Generalized configurations and functional descriptions of measuring instruments*. In: Measurement systems: application and design. 2.ed. EUA: McGraw-Hill, p.9-37, 1976.
- FERRANTE, M.** Fratura. In: *Seleção de materiais*. 1.ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, p.131-71, 1996.
- FIGLIOLA, S. R., BEASLEY, D. E.** *Measurement system behavior*. In: Theory and design for mechanical measurements. 1.ed. New York: J. Wiley, p.63-104, 1991.
- HERTZBERG, R. W.** *Transition temperature approach to fracture control*. In: *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 4.ed. New York: J. Wiley, p.297-323, 1995.
- INTERNATIONAL STANDARD.** Steel - Charpy V-notch pendulum impact test - instrumented test method. Geneva: ISO, 14p. (ISO 14556), 2000.
- IRELAND, D. R.** *Critical review of instrumented impact testing*. *Journal of Dynamic Fracture Toughness*. v.1, p.47-62, 1977.
- IRWIN, G. R.** *Fracture Dynamic, Fracturing of Metals*. American Society for Metals. Cleveland p. 147-66. 1948.
- KOBAYASHI, T.,** "Development in the instrumented impact test – Computer aided instrumented impact testing system", In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v.1, pp.127-134, 2001.
- KOBAYASHI, T., TODA, H. & MASUDA, T.,** "Analysis of test data obtained from Charpy-V and impact tensile test", In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v.1, pp.305-312, 2001.
- KRUGER, E. L.** *Implementação da Norma ISO 14.556 Pra Instrumentação do Ensaio Charpy Convencional e Comparação com Nova Metodologia Proposta*. Ilha Solteira,. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de São Paulo "Júlio de Mesquita Filho", 2003.
- KRUGER, E. L.** *Determinação da Tenacidade a Fratura Dinâmica, K_{Id} e J_{Id}, apartir dos resultados do ensaio de impacto Charpy Instrumentado*. Relatório FAPESP. Campinas, Univessidade Estadual de Campinas março/2005.
- LANDREIN, P., LORRIOT, T. & GUILLAUMAT, L.,** "Influence of some test parameters on specimen loading determination methods in Instrumented Charpy impact tests". In: Engineering Fracture Mechanics, vol.68, p. 1631-45, 2001.
- MANAHAN, M. P. & STONESIFER, R. B.,** 2001, "Studies toward optimum instrumented striker designs", In: Charpy Centenary Conference, France, v.1, p.151-162, 2001.

- MANAHAN, M. P., STONESIFER, R. B., SIEWERT, T. A., MCCOWAN, C. N. & VIGLIOTTI, D. P.**, 2001, "*Observations on difference between the energy determined using an Instrumented striker and dial/enconder energy*", In: Charpy Centenary Conference, France, v.1, p.45-60, 2001.
- MORITA, S., OTANI, M. & KOBAYASHI, T.**, 2001 "*Problems related to the measurement of load signal in the Instrumented Charpy impact test*", In: Charpy Centenary Conference, France, v.1, p.135-42, 2001.
- PEROZANZ, F. J. et al.** *Cálculo de la tenacidade de fratura através de ensayos dinamicos*. Revista Metalúrgica, v.33. p.399-405, 1998.
- QUINAN, M. A. D.** *Análise de ensaio instrumentado de impacto tipo Charpy*. Belo Horizonte. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, 1996..
- REED – HILL, R. E.** *Princípio de Metalurgia Física*. 2ed Guanabara Dois S.A, 776 p; 1982.
- RODRIGUES, A. R.** Charpy Instrumentado – *Determinação da tenacidade à fratura dinâmica de materiais metálicos*. Ilha Solteira. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2001.
- RODRIGUES, A. R; TOKIMATSO, R. C.** *Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica Aparente a Liga de Alumino AI7050 por meio do Ensaio Charpy Utilizando diferentes Transdutores*. Material Science, vol 2, p. 224-232, COBEM 2001.
- Reference Manual – *SoftWare. Instron Wolpert SoftWare for Instrumented Pendulum Impact Testing Machines*. 1999.
- SERVER, W. L.**, "*Instrumented Charpy test review and application to structural integrity*", In: Charpy Centenary Conference, France, v.2, p.843- 50, 2001.
- SCHMITT, W. SUM. D. Z. BÖHME, W. et al.** *Evaluation of Fracture Toughness Based on Results of Instrumented Charpy Test*, *International Journal of Vessel & Piping*, v.21-9, 1994.
- SHOKEY, D. A.** *Dynamic fracture testing*. In: NEWBY, J. R. (Coord.) ASM handbook: Mechanical Testing. 9.ed. Ohio: ASM, p.259-61, 1995.
- TANGUY, B., PIQUES, R. & PINEAU, A.**, "*Experimental analysis of Charpy V-notch specimens*", In: Charpy Centenary Conference, France, v.1, p.425-32, 2001.
- TANGUY, B., BESSON, J., PIQUES, R. & PINEAU, A.**, "*Numerical modeling of Charpy V-notch tests*", In: Charpy Centenary Conference, France, v.2, p.737-44, 2001.

- TOKIMATSU, R. C.** *Influência de parâmetros microestruturais e procedimentos de ensaios no comportamento mecânico de um aço de ultra resistência e baixa liga*. Campinas. 435p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 1995.
- TOKIMATSU, R. C., FERREIRA, I.** *Inconvenientes e Confusões Decorrentes da Classificação de Fraturas Segundo a Base Dual Dútil-Frágil*. 53º Congresso anual da ABM, Belo Horizonte-MG, Brasil. p. 17, 1998.
- TOROPOV, A. I., GROSSO, M.** *Dynamic Calibration of impact test Instruments*, In: *Journal of Testing and Evaluation*, vol.26, nº4, p. 315-19, 1998.
- TOTI, F. A.** *Tenacidade à Fratura Dinâmica de uma Liga de alumínio de Alta Resistência AMS 7475T7351*. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais-EESC/USP, 2004.
- TRONSKAR, J.P., MANNAN, M.A. and LAI, M.O.**, “*Correlation between quasi-static and dynamic crack resistance curves*”. In: *Engineering Fracture Mechanics*, vol.70, p. 1527-42, 2003.
- TRONSKAR, J.P., MANNAN, M.A. and LAI, M.O.**, “*Direct measurement of displacement in Instrumented Charpy impact testing for Structural Integrity Assessment*”. In: *Journal of Testing and Evaluation*, vol.29, nº3, p. 246-57, 2001.
- TRONSKAR, J.P., MANNAN, M.A. and LAI, M.O.** “*Measurement of Fracture Initiation toughness and crack resistance in Instrumented Charpy Impact Testing*”. In: *Engineering Fracture Mechanics*, vol.69, p. 321-28, 2002.
- YAMAMOTO, I. KOBAYASHI, T.** *Evolution Method of Dynamic Fracture Toughness by the Computer Aided Instrument Charpy Impact Testing System*. *International Journal Pres. Ves. Piping*, vol.55,p.295-312, 1993.
- YAMAMOTO, I. et al.** *Introduction of a New Dynamic Fracture Toughness Evaluation System*, *Journal of Testing and Evaluation*, v.21, n.3,p.145-53,1993.